

自動運転車，燃料電池車，電気自動車に関する イノベーションの研究

——自動車会社，部品会社，IT企業による
次世代自動車の社会的価値の創造——

村 山 博*

目 次

- 1 章 はじめに
- 2 章 自動車のコンピューター化によるイノベーション
 - 2—1 コンピューターと自動車の合体
 - 2—2 自動車のコンピューター化と系列崩壊の可能性
 - 2—3 トヨタとデンソーの絶妙な距離感
- 3 章 電気自動車のイノベーション
 - 3—1 地球環境問題と電気自動車
 - 3—2 電気自動車の課題とその対策
 - 3—2—1 電気自動車の価格が高い問題
 - 3—2—2 電気自動車の走行距離が短い問題
 - 3—2—3 電力供給のための充電時間が長い問題
 - 3—2—4 スーパーチャージャー・ステーションが少ない問題
 - 3—2—5 希土類金属ネオジウムの偏在問題と石油会社の反対問題
- 4 章 燃料電池車のイノベーション
 - 4—1 エネルギー問題がもたらす内燃機関の終焉と燃料電池車の登場
 - 4—2 燃料電池車の開発史
 - 4—3 燃料電池車のイノベーション
 - 4—4 燃料電池車の課題とその対策

* 本学経営学部教授

キーワード：イノベーション，コンピューター，自動運転車，燃料電池車，電気自動車

5 章 自動運転車のイノベーション

5—1 自動運転車の胎動

5—2 自動運転車の社会的価値

6 章 まとめ

1 章 はじめに

日本の第2次産業は1995年にGDPの3分の1を占めていたが、現在では4分の1に下落している。日本経済は、戦後間もない1950年後半から平均10%の高成長を続けたが、現在ではその片鱗すらない。戦後の高成長は製造業が牽引し、現在の低成長は製造業の衰退の結果である。1000兆円を超える公的債務問題は製造業の減少が一つの要因である。電機会社や自動車会社の海外への工場移転が日本国内の製造業を減少させ、日本の雇用や法人税を減少させた。一方、米国はシリコンバレーに代表されるコンピューターやインターネットを活用した新たなビジネスが急増し、成長する米国と停滞する日本の差が鮮明になった。このような状況でも、日本の技術貿易収支は20年連続で増加し、その技術貿易黒字幅は10年で4倍に増加している。2012年の技術貿易収支は約2兆2724億円で過去最高を記録し、自動車などの輸送機用機械製造業が1兆4569億円の輸出超過で、技術貿易収支全体の6割を占めている。これは自動車を中心とした日本の製造業の研究開発力の高さを如実に示している。何故自動車産業だけが成長できるのか、また、どうすれば日本の製造業が高成長路線に復帰できるか、を探究するのが本論文の発端である。

2013年の日本の輸出額69兆8000億円の内、最大の輸出品は自動車で輸出額の20%（自動車14.9%、自動車部品5.0%）を占めている。日本の自動車業界は、国内で963万台を生産し内467万台を輸出し、常に国際競争力を念頭に経営戦略を練ってきた。日本独自の自動車生産システムであるトヨタ生産方式、ジャストインタイム、TQC・TQMなどは、海外企業が競って導入し、日本のリーン生産システムの優秀性は世界に知られている。これらにより、品質管理や技術管理や納期管理や在庫管理などが研ぎ澄まされ、日本の自動車産業は海外勢の追従を許さない所まで到達しつつある。反面、GDPの大半を占めるサービス産業は、輸出も輸入も製造業の20%に過ぎない。このように、日本における製造業、なかでも自動車産業の重要性は今でも揺るがない。

輸出国での貿易摩擦を経験した結果、日本の自動車産業は、他の産業に先駆けて海外生産や国際提携を断行し、グローバル企業としての道を早くから歩んできた。逆に、米国自動車業界は、外国企業による米国への自動車輸入を停止するように、保護貿易を米政府に強く要求して

きた¹⁾。日本の自動車会社は，グローバル競争にさらされてきたため，どの産業よりも研究開発の重要性を熟知しており，その企業進化速度も他の業界を圧倒している。

2013年度のトヨタ自動車（ダイハツ工業，日野自動車を含む）は全世界で1013万3000台販売し，年間の販売台数が1000万台を超える世界初の自動車メーカーとなった。日本経済新聞が報じる「米ブランドコンサルティングのインターブランドの2014年世界ブランドランキングトップ100」²⁾において，トヨタ自動車（以下はトヨタ）は日本企業トップの世界9位であり，本田技研工業（以下ホンダ）20位，日産自動車（以下ニッサン）56位と，日本の自動車メーカーが上位を占めている。日本の自動車会社は，日本だけでなく世界経済の牽引役になっている。

日本の自動車メーカーは，電子制御燃料噴射技術，直噴ガソリンエンジン技術，リーンバーン（希薄燃焼）技術などによる内燃機関の技術開発で世界を圧倒してきた。さらに，トヨタやホンダは，厳しい排気ガス規制を世界に先駆けてクリアし，プリウスなどのハイブリッド車で最高の燃費性能を実現するなど，イノベーションを連発している。現在，トヨタが販売する自動車の半分以上がハイブリッド車である。トヨタのハイブリッド車は世界累計販売台数が700万台を超えている。米カリフォルニア州は無公害車（ZEV）規制において，燃料電池車，電気自動車，プラグイン・ハイブリッド車が新車の15%以上になることを要求している。また，欧州連合加盟国と欧州会議が，温室効果ガスの削減目標で合意し，自動車メーカーは新車の二酸化炭素排出量を2021年までに平均で95g/km以下に減らすように義務付けられることになった。現状の160g/kmに比べ，自動車メーカーは4割も削減しなければならない。これは，事実上，燃料電池車や電気自動車やプラグイン・ハイブリッド車の義務化に等しい基準である。今後，自動車業界では激しい研究開発が行われ，社会を変革するイノベーションが起きると考えられる。なかでも，燃料電池車，電気自動車，自動運転車が，研究開発の中心になると考えられる。

今まで日本の自動車産業は，小さな技術を巧みに組み合わせる漸進的なイノベーションが主

1) ウィリアム・J・ボーモル著，田中健彦訳 [2014]「良い資本主義 悪い資本主義」書籍工房早山

「米国の自動車産業や鉄鋼業界は寡占下の大企業が競合への意欲を失い，外国のライバルからの攻撃を鈍らせるように保護貿易を求めた。大企業は技術革新をしない。大企業は官僚化しすぎて，たとえ素晴らしい技術を見てもその意味を理解し，それに対応しようとする能力すら失う。大企業資本主義は硬直化し，革新に背を向け，変化に抵抗する。トヨタとホンダが，大企業でありながら，すでに高い車の信頼性をさらに改良する仕事と，市場のどれよりも燃費効率のよいハイブリッドカーを生み出す革新的な仕事を成し遂げることによって，大企業であっても継続していけることを示した。」

2) 2013年度（2013年4月～2014年3月）日本自動車の生産台数（全世界ベース）

＜1位＞トヨタ自動車：1023万6055台 ＜2位＞日産自動車：507万8081台 ＜3位＞本田技研工業：440万3072台 ＜4位＞スズキ：285万6849台 ＜5位＞マツダ：126万9296台 ＜6位＞三菱自動車：126万8973台 ＜7位＞富士重工業：81万3422台

（注）<http://building-pc.cocolog-nifty.com/helicopter/2014/04/post-d592.html>

体であった。それは日本の自動車業界が得意とする内燃機関を前提にした研究開発によるものであった。しかし、電気自動車と燃料電池車は内燃機関が不要になるだけでなく、自動車メーカーは経験がない二次電池や水素発電の研究開発をすることになる。さらに、自動運転車はコンピューターとインターネットの活用が中心となることから、ネットワーク外部性は無縁であった自動車業界に激震が走る可能性がある。これは日本の自動車産業の特徴であった完成車メーカーと自動車部品メーカーとの系列体制を揺るがしかねない。これからの研究開発は、過去の技術蓄積がまったく活用できない未経験の技術分野で展開されることになり、今までのルールや常識を根底から変えてしまう革新的な研究開発になると考えられる。今、日本の自動車産業が立ち向かっている問題は、単なる技術開発競争や発明競争ではなく、自動車業界以外の業界や企業を巻き込んだ社会を激変させるイノベーションの創造である。

そこで、本論文は、主にトヨタ、ホンダ、ニッサンの自動車メーカーの特許を分析し、その特許に示されている研究開発内容を読み込み、各社の技術戦略を研究する。本論文は、自動運転車、燃料電池車、電気自動車などに関する諸技術課題を深く研究し、各社の研究開発やイノベーションに挑戦する姿を浮き彫りにし、日本の自動車業界が目指すべきイノベーションを提言するものである。

2章 自動車のコンピューター化によるイノベーション

2-1 コンピューターと自動車の合体

コンピューターの頭脳にあたるマイクロプロセッサは、私たちの家にあるものだけでも100個を超え、私たちの便利で快適な生活を支えている。エアコン、冷蔵庫、洗濯機、炊飯器、テレビ、スマホなどに、多くのマイクロプロセッサが組み込まれ、機能性や安全性の向上、省エネ対策になくしてはならないものとなっている。その変化のスピードは人類が経験した歴史の中で最も速い³⁾。これは我々の生活やその環境がコンピューターの進歩に依存するようになったためである。

映画館のコンピューター化は、日本にある3290館の内90%がデジタル化するなど急速に進んでいる。コンピューターの飛躍的な進歩は、3Dアニメ映画を可能にただけでなく、今まで

3) K・ケリー著、服部桂訳 [2014]「テクニウム テクノロジーはどこへ向かうのか？」みすず書房 「性能が倍増するまでの時間：無線（毎秒のビット数）10か月、磁気記憶の記憶速度（1平方インチあたりのギガビット数）12か月、デジタルカメラ（価格あたりの画素数）12か月、スーパーコンピューター（FLOPS）14か月、RAM（価格あたりのメガバイト数）16か月、ハードディスク（価格あたりのギガバイト数）20か月、半導体チップ（MIPS）21か月」

の2Dアニメ映画より格段に優れたストーリーや表現方法を実現した⁴⁾。井関農機は、田植え機の前輪にセンサーを搭載し超音波で土の深さを、電気抵抗で肥料の肥沃度を検知し、適正な肥料を自動的にまく田植え機を開発した。このような田植え機とコンピューターの合体は、稲の収穫量を向上させ肥料コストを低減させる効果がある。病院ではコンピューターが検査や診断に活用され、ベッドの空きの確認や患者の待ち時間の短縮に貢献している。コンピューター診断は、個人の体質やDNAを考慮したオーダーメイド医療を可能にした。スーパーコンピューターによるシミュレーションは、画期的な新薬の開発に寄与している。iPS細胞や再生医療や動植物のゲノム研究などのライフサイエンス分野，リニア新幹線などの超電導技術分野，ナノテクノロジー・バイオテクノロジー分野など，あらゆる研究開発にコンピューターはなくてはならないものとなっている。

グーグルは、人間の眼球やコンタクトレンズを使ってコンピューターを制御することを可能にした⁵⁾。超小型のカメラを埋め込んだコンタクトレンズを装着した視覚障害者が健常者と同じ生活を過ごせる世界が広がりつつある。身体障害者に優しい支援ロボットが実用化され，障害を気にせず快適な生活ができる日も近い。このように，コンピューターが医療や健康増進に飛躍的な進歩をもたらしている。人とコミュニケーションできる介護・生活支援ロボット，人の顔を認識できる警備ロボット，人の身体機能を助ける身に着けるロボット，人が入れない所で働く清掃ロボット，人が行けない場所で働く地雷探査ロボット，365日24時間待機するレスキューロボットなどが当たり前の世界になってきた。今後，コンピューターは人間の生活に密着するだけでなく，人間とコンピューターとの境界が不明瞭になり渾然一体となった世界にな

4) フランシス・ヨハンソン著，幾島幸子訳 [2014]「アイデアは交差点から生まれる」阪急コミュニケーションズ 「スティーブ・ジョブズ率いるピクサー社は、誕生して10年以上たつ3D技術を新たなレベルに引き上げた。コンピューターアニメは、イノベーションのチャンスを限りなく広げた。伝統的なアニメの平均的な作品（1秒24コマ×75分）では、アニメーターは10万枚以上のセルアニメを1枚1枚手描きで描かなければならなかった。コンピューターアニメは、何万台という超高速のコンピューターが作っている。アニメーターは手描きから解放され，登場人物の動きに集中できるようになり，実にいきいきとした動きをさせることが可能になった。したがって，ピクサーはアニメーターを採用する際，絵がうまいかどうかより演技の才能を重視するようになった。」

5) 小川和也 [2014]「デジタルは人間を奪うのか」講談社現代新書 「2014年4月，グーグルが超小型のカメラをコンタクトレンズ内に埋め込むことを基本理念とした特許を申請した。このカメラ内蔵のコンタクトレンズは，視覚障害者に対して装着者の位置や危険な障害物の存在を知らせるなどの医療装置技術への応用が考えられる。糖尿病患者向けに，涙液中のグルコース濃度を測定するための，スマートコンタクトレンズが開発されている。レンズは極小のワイヤレスチップと小型化されたグルコースセンサーを備え，それぞれが2層になったレンズの間に組み込まれている。グルコース値は，運動や食事，あるいは発汗で変化する。従来は突然の上昇や急激な低下は危険なため，24時間の監視が必要で，身体に針を刺し血液検査をしなければならなかった。」

ると考えられる。現在の日本では約30万台のロボットが働いている。人口減少が確実視される日本では、ロボットの数が日本人の数を超える日はそれほど遠くない。将来、各国の人口は、人間の数とロボットの数を合算した数字を使うようになると考えられる。

これらのコンピューターの未来を誰よりも早く的確に理解し実用化しているのが、トヨタに代表される日本の自動車産業である。日本の自動車メーカーは、コンピューターと自動車を結婚させ、ハイブリッド車や電気自動車などの頼もしい子供を次々と誕生させている。コンピューターがなければ、ハイブリッド車や電気自動車もこの世に出現しなかった。現在の自動車はマイクロプロセッサを200個以上搭載した「走るコンピューター」になった。このように多くのマイクロプロセッサを搭載する理由は、マイクロプロセッサの処理速度が電子の移動距離に依存するためである。年々、マイクロプロセッサの集積度が高くなり、回路が微細化し、電子の移動距離が短くなり、マイクロプロセッサの処理速度が飛躍的に向上した。そのため、人間では対応不可能な1000分の1秒以下の瞬時の判断をコンピューターに委ねた方が安全で正確な判断ができるようになった。さらに、マイクロプロセッサが大量生産され、その価格が著しく低下した。このような理由から自動車のコンピューター化は拡大の一途を辿っている。

さらに、コンピューターとクラウドが合体することで、コンピューターの処理能力を無制限、かつ、無料で使うことができるようになった。その結果、コンピューター同士が結び付き、人だけでなくモノや機械やロボット同士が繋がった。クラウド技術のお蔭で自動車のコンピューター化はますます進展し、今までの自動車のコンピューター制御だけでなく、「自動車を起点とした繋がる社会」が現実味を帯びてきた。

自動車のコンピューターは、ガソリンと空気の混合比を運転状況に合わせ精密に調節し、一酸化炭素(CO)、窒素酸化物(NOx)などの有害物質を可能な限り無害化する役目を担っている。安全面でも、アンチ・ブレーキ・システム(ABS)や衝突時のエアバックはコンピューターがなければ作動しない。ミリ波レーダーやレーザーレーダーを装備する自動車のコンピューターは、前を走る自動車との車間距離を測り、車間距離が縮まるとエンジンプレーキで減速し、さらに接近するとブレーキをかけて停止し衝突事故防止に貢献している⁶⁾。赤外線による暗視機能を装備する自動車のコンピューターは、夜間でも自動車や人体の温度を検知することにより、自動車や人間の姿を車内の液晶画面やフロントウインドウに映し出し、ドライバーに注意を喚起する。交通事故の3割を占める駐車場の事故もコンピューターが衝突回避性能を向上さ

6) 鶴原吉郎, 仲森智博 [2014]「自動運転」日経BP社 「ミリ波レーダーは、電磁波を前方に発信し、物体にぶつかって反射してきた電磁波を受信してから戻ってくるまでの時間を測ることで物体との距離を測定する。クルマに使っているミリ波レーダーは、周波数が76ギガヘルツの電磁波を使っている。これに対してレーザーレーダーは、赤外線レーダー光を使って同様に物体までの距離を測定する。レーザーは光であるため、空気中のちりや水分などで拡散されやすい。雨や雪が降っているときは、この傾向が強くなる。」

せている。自動車のコンピューターは、超音波センサーを使って駐車場の空き状況を把握しドライバーの死角をなくすことに成功している。自分の自動車を真上から俯瞰できるアラウンドビューモニターやパノラミックビューモニターやリアビューモニターやリアスルーモニターなどの画像は、車庫入れが苦手なドライバーのストレスを解消している。

電気自動車のコンピューターは、バッテリーの直流電流を交流電流に切り替えてモーターに供給するだけでなく、減速時には、モーターを発電機に切り替えて回生（充電）を行う。ハイブリッド車のコンピューターは、運転状況を検知しエンジンとモーターを最適な組み合わせになるように、即座に演算し優れた燃費性能を実現している。ハイブリッド車は、低速走行では電気自動車として走り、高速走行ではガソリン車として走る。その中間の速度では、電気自動車とガソリン車の最適組み合わせをコンピューターが演算し決定する。同時に、自動車のコンピューターは、ガソリンエンジンでの走行中にはモーターで充電するかを即座に演算し、最も燃費効率のよい走行を実現している⁷⁾。

このように現在の自動車には、コンピューターは不可欠な存在になっている。今後さらにコンピューターの活用が進み、ドライバーが指示しなくても自動車のコンピューターが勝手に他の自動車のコンピューターと通信で結ばれ、自動車同士が会話することになる。このように、IoT(Internet of Things モノのインターネット)が進展すると、すべての自動車がインターネットに接続され相互に情報を共有することが可能になる。ドライバーの知らない情報を自動車のコンピューターが判断して、故障や燃料漏れや部品交換などの情報を提供してくれる。自動車のコンピューターは、運転状況と道路状況などの情報を基に、事故防止や保守点検に寄与し、自動車の安全性や信頼性がさらに向上すると考えられる。センサーによる橋梁の老朽化のモニタリングが始まっている。将来、自動車が橋梁やトンネルや道路のモニター情報を受け取り、通過可否を自動車のコンピューターが判断することになる。

7) [2014]「次世代自動車2014」日経ビジネス 「ハイブリッド車のトヨタ方式は、エンジン駆動とモーター駆動の比率を、燃費が最適となるように遊星歯車機構により切り替えながら運転する。走行モードはEV走行、HV走行の2つ。HV走行では、エンジン出力を遊星歯車で動力分割し、発電機で発電した電力によるモーター駆動力と、発電に回されなかった分のエンジン出力を合わせて走行する。エンジンをかけたときは、できるだけ燃費の良い領域で運転し、駆動力が余ったり、足りなくなる部分は発電機を充電したり、モーターのアシストを使うことで補う。」「ホンダのアコードでは通常走行のほとんどをモーターの駆動力でまかなう。高出力のモーターで、EV走行の割合を増し、急加速や電池のSOC（充電状態）が下がった場合だけエンジンをかける。エンジンによる発電でSOCが上がると、EV走行に戻る。一方、車速が100km/hrを超えると、エンジンの駆動力による走行に切り替える。この場合、普段エンジン出力を駆動系から切り離しているクラッチを締結し、タイヤに直接出力を伝える。負荷が高いときにはモーターがアシストし、負荷が低いときには充電する。60km/hrの定常走行では、EV走行とHV走行の割合は半々、100km/hrの場合は、およそ1/3がEV走行になる。その結果、アコードの最大熱効率率は38.9%まで向上した。」

インターネットビジネスの先駆者であるアップルやグーグルは、このような自動車のコンピューター化を見逃してはいない^{8, 9)}。アップルのCarPlay自動車連合には、GM、ヒュンダイ、ホンダ、メルセデス、ニッサン、ボルボ、ポルシェ、アキュラ、インフィニティが参加している。一方、グーグルのAndroid Auto自動車連合には、ヒュンダイ、アウディ、GM、ホンダが参加している。アップルとグーグルが完成車メーカーを従える企図が完成しつつある。興味深い点は、ホンダがどちらにも参加しており、逆に、トヨタがどちらにも属していないことである。トヨタは、自動車メーカーでもないアップルやグーグルが次世代自動車の主導権を握ることに強い違和感を持っていると推察される。

自動車関連分野でもコンピューター化が進んでいる。グーグルグラスのようなスマートグラスを活用した自動車修理では、修理に必要な道具の保管場所がスマートグラスに表示される。それぞれの道具に付けられたバーコードを読み取り確認が行われるので、初心者や素人でも熟練者と同じように自動車修理ができる。駐車場の出入り口にカメラを設置し、入出庫する自動車のナンバープレートが撮影され、コンピューターが自動車のナンバーからクラウドを使い自動車の登録地域を探し出す。その情報は、来店者の動向を細かく把握できるため、折り込みチラシの配付場所や誘導用の道路看板の設置場所を最適化し販売促進につながる。このように自動車の情報がさまざまなビジネスに活用され始めている。

図1は、トヨタ、ホンダ、ニッサンのコンピューター利用の研究開発比率の推移である。特許公開件数は特許庁ホームページの検索ソフトを利用している。各社の研究開発規模が異なるため、縦軸はコンピューター利用に関する特許件数を各社の全特許件数で割り算した特許比率とした。これにより、各社の研究開発の重点の置き方を推定することができる。特許出願の1年半後にすべての特許は公開される。一般的に特許出願から約2年後に特許が登録され排他的独占権の行使が可能になることから、出願年ではなく公開年のデータを採用した。横軸を1995年から2013年までの過去19年間の公開特許とした理由は、特許が出願から20年間（公開から18.5年間）の排他的独占期間が認められているためである。さらに、登録されなかった公開特許でもノウハウの蓄積に寄与しているため、調査対象は公開特許とした。

図1が示すように、トヨタはホンダやニッサンに比べ、自動車のコンピューター化に関する研究開発比率が最も高い。反面、ホンダはコンピューター化に関する研究開発比率が低く、そ

8) フランシス・マキナーニー著、倉田幸信訳 [2014]「日本企業はモノづくり至上主義で生き残れるか」ダイヤモンド社 「アップルとグーグルは自動車を「車輪の付いたクラウド接続デバイス」と見なしており、自動車業界におけるブランド順位を短期間でひっくり返す可能性もある。」

9) [2014]「次世代自動車2014」日経ビジネス

「アップルはiPhone, iPadのiOSを用いた端末をカーナビやゲームとして利用する機能を明らかにした。iOS 7はiOS in the Car機能に対応する。ホンダと日産はiOSに対応する。」

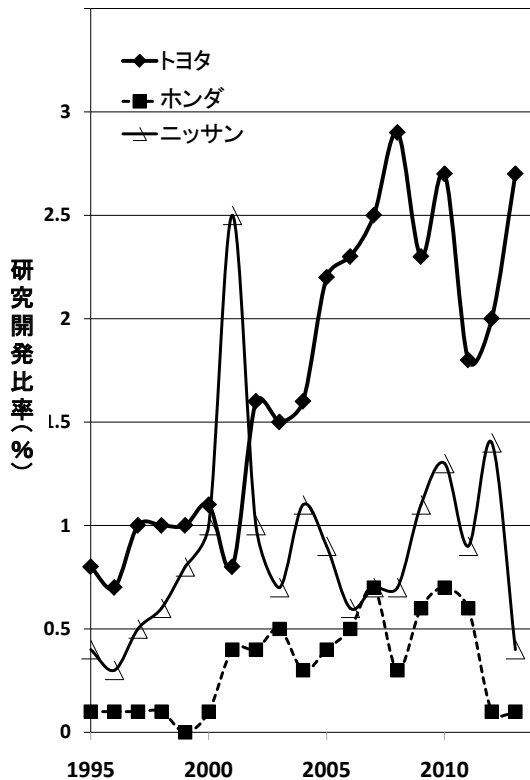


図1 コンピューター利用の研究開発比率の推移

の中間がニッサンである。トヨタはデンソーなどのコンピューター制御に強い系列企業を持っている。しかし、自動車のコンピューター化の研究開発を部品会社に丸投げせず、トヨタは自動車のコンピューター化に非常に熱心である。この傾向は1995年以前から長く続いており、トヨタの特徴のひとつとなっている。

2-2 自動車のコンピューター化と系列崩壊の可能性

現在のコンピューターはモジュール化されている。マイクロプロセッサ、オペレーション・システムOS、アプリケーション・システム、キーボード、ディスプレイなどのモジュールを別々の会社が製造し、コンピューターメーカーがモジュール部品を組み立てるだけでコンピューターが作られる。モジュールのインターフェイスは公開されるため、誰でもモジュールの製造に参入できる。そのため、参入企業が増え、企業間の切磋琢磨が技術革新を加速した。モジュールのインターフェイスさえ守れば、モジュール内は独自開発が可能であるだけでなく、公表する義務がない。他社が追随できないモジュールを開発した企業は、コンピューターメーカーを

支配下に置くだけでなく、デファクト・スタンダードを握り、莫大な利益を得ることも可能になった。コンピューターを製造する企業よりも、コンピューターの一つの部品であるモジュールで主導権を獲得した企業の方が有利となった。コンピューターメーカーと部品メーカーが主従を逆転させたように、自動車のコンピューター化は、従来の完成車メーカーと自動車部品メーカーとの主従関係を逆転させる可能性がある。

コンピューターの中央処理演算装置CPUなどを製造するインテルが、部品を納入するIBMなどのコンピューター製造企業を支配する地位の逆転が発生した。IBMは、当初からインターフェイスを公開しIBM互換機への参入を促す戦略を採用していた。そこで、インテルはIBMのインターフェイスに従った独自のCPUを開発して急成長し、マイクロソフトも独自のOSを開発して急成長した。さらに、台湾のパソコン部品メーカー群が形成され、この部品で安価なパソコンを組み立てるメーカーが乱立し、IBMは2004年に中国レノボに売却され、パソコン事業から撤退した。これは、電機メーカーの主導権が半導体メーカーに完全に移った瞬間でもあった。この結果、日本のコンピューター国内生産は激減した。1997年のコンピューター国内生産は6兆6000億円であったが、2013年には1兆2000億円になり、日本はコンピューターの輸入国に転落した¹⁰⁾。

インテルがIBMを逆転した現象が、自動車業界でも起きないとは限らない。過去の自動車はコンピューター利用が限定されており、自動車は機械部品で組み立てられる機械であった。そのため、完成車メーカーは独自に研究開発・企画・設計・製造・販売を行い、自社で造るよりコスト面で有利な機械部品だけを部品メーカーから購入することが一般的であった。そのため、完成車メーカーごとに部品メーカーが系列化された。それは、あたかも完成車メーカーが太陽で、部品メーカーが太陽を回る惑星（中規模の部品メーカー）、その惑星を回る衛星（小規模の部品メーカー）の太陽系を形作っている。ところが、自動車のコンピューター化は、太陽の周りを回るとされていた惑星が、いつの間にか太陽系の中心となり、完成車メーカーを太陽系の中心の座から追いやる可能性を秘めている。

自動車のコンピューター利用が進展している現状では、トヨタなどの完成車メーカーと、デンソーやボッシュなどの部品メーカーとの従来の関係が劇的に変わろうとしている。コンピューターの中核技術を握る部品メーカーが、「単なる組み立て屋」の完成車メーカーを支配する構図が浮き彫りになってきた。グローバルなM&Aを得意とする巨大資本と最先端技術を併せ持った部品メーカーは、モジュール化したコンピューターのソフトウェアとハードウェアを武器に、完成車メーカーと天下分け目の決戦に挑もうとしている。この機に乗じて、総合電機メーカーであるパナソニックは、スペインの自動車部品大手フィスコサを傘下に収めるなど

10) 西村吉男 [2014]「電子立国は、なぜ凋落したか」日経BP社

のM&Aを仕掛け、自動車部品メーカーに本格的に転身することで、完成車メーカーを支配下に置く戦略に転換している¹¹⁾。また、日本電産、日立製作所、東芝、三菱電機、ソニーなども、自動車部品メーカーとして参戦している。

自動車会社の系列はデンソーを除けば、ほとんどが機械部品を取り扱う部品メーカーである。自動車のコンピューター化は、系列の主役であった機械部品を製造する企業を脇役にすると同時に、自動車とは無関係であったパナソニックや日立製作所や三菱電機などの総合電機メーカーを新たな主役に押し上げた。ボッシュなどのグローバル部品メーカー、自動車部品メーカーに転身した総合電機メーカー、アップルやグーグルなどのIT企業が参戦した自動車のコンピューター化戦争の火蓋が切られようとしている。この戦争は、自動車メーカーの系列企業にとって、今までの機械部品加工ではなく、経験が少ないコンピューターという新しい武器での戦いになる。この勝敗は、自動車会社、自動車部品会社、総合電機会社、IT企業などの今後の力関係を決定する。このため、自動車のコンピューター化戦争は、否応なく系列の再編を加速させることになる。

トヨタはデンソーの株式24.9%、アイシンの株式22.2%を保有している。トヨタは、デンソーやアイシンを筆頭に、持ち株比率20%を超える部品メーカーが40社を超える。トヨタは系列企業との距離感に細心の注意を払いながら系列を維持してきた。トヨタは系列企業の間に厳しい競争を導入し、系列企業の1社しか製造できず系列内の競争がないときは、トヨタ自らが部品を内製してまで競争環境を生み出してきた。系列内で競争させることは、コスト削減や性能向上のメリットが大きい。反面、それぞれの企業は小規模になり、デンソーやアイシンを除けば、世界的に独り立ちできる企業が育たないデメリットもある。

デンソーの独自技術である最大2500気圧の燃料噴射圧力を実現できる燃料噴射システムやダウンサイジング・ターボ過給システムや予混合圧縮着火システム¹²⁾は、トヨタにとって、できれば普及させたくない技術である。これはトヨタが推進するハイブリッド車や燃料電池車に

11) 日経新聞2014年9月25日 「パナソニックはスペインの自動車部品大手フィスコサを傘下に収める。フィスコサは自動車ミラーで約2割の世界シェアを握り、独フォルクスワーゲンや仏ルノーなどの欧州勢を中心に世界の自動車大手に納入。カメラを使って車両周辺の障害物を認識する技術開発も手掛けている。カメラでとらえた側方や後方の様子をミラーに映すなど、ミラーは自動運転などの運転支援システムでも中核部品。」

12) [2014]「次世代自動車2014」日経ビジネス 「次世代ディーゼルは、3000barの高圧噴射や電動ターボチャージャー、可変バルブ機構などを搭載することで、出力を維持しながら排気量を縮小することを可能にした。欧州メーカーは、燃費向上技術の柱に、過給によるダウンサイジングを据えている。中国はコストが高いHVではなく、より低コストで現実的なダウンサイジングに傾斜し始めた。中国という世界最大の市場でダウンサイジング技術が主流になれば、量産効果で部品コストが下がり、日本のメーカーが力を入れるハイブリッド技術が不利な状況に追い込まれる。」

対抗するクリーンディーゼル車やダウンサイジング車（ガソリンエンジンの排気量を縮小した自動車）の強力な援軍になるためである。このデンソーの技術は、ハイブリッド車や燃料電池車にコスト面で踏み切れない中国自動車メーカーに、ダウンサイジング車やクリーンディーゼル車を、タダ同然でプレゼントすることになる。さらに、デンソーの技術は、研究開発の努力をしない自動車メーカーに、研究開発費ゼロと研究開発期間ゼロのおまけまで付けることになる。

図2は、1995年から2013年までのトヨタ、ホンダ、ニッサンのクリーンディーゼルエンジンに関する研究開発比率の推移である。トヨタとニッサンは、クリーンディーゼルエンジンに関する研究開発を急激に減少させている。ホンダは元々クリーンディーゼル車に興味がないと考えられ、研究開発比率が最も少ない。この研究開発比率の低下は、クリーンディーゼルエンジンの研究開発の完了を意味するものではない。日本の自動車メーカーが、ハイブリッド車や燃料電池車や電気自動車に研究者や研究費を集中的に配分したため、クリーンディーゼル車の研究開発を仕方なく減少せざるをえなかったと考えられる。図3は、ディーゼルエンジン特許に

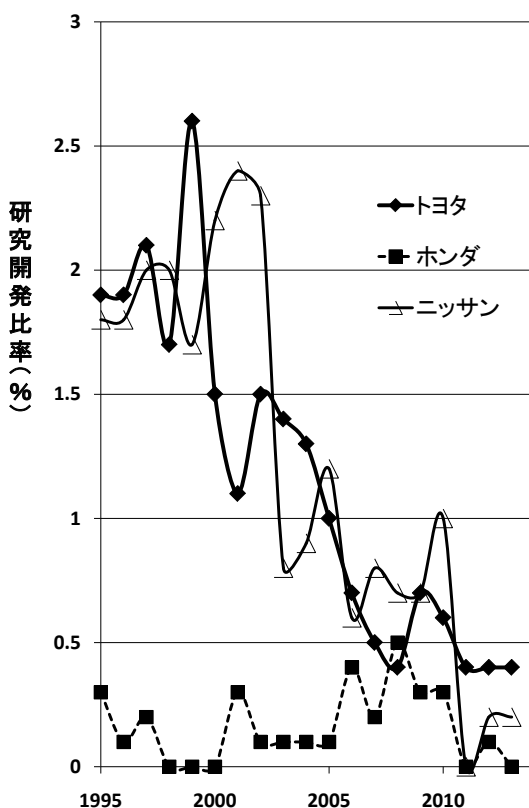


図2 クリーンディーゼルの研究開発比率の推移

おける外国企業の比率であり，外国企業は1995年にはゼロであった公開特許を急増させている。図2のトヨタと日産による急減と，図3の外国企業による急増は，クリーンディーゼル車戦略において，明瞭な違いとなって公開特許に現れている。

最近，トヨタが研究開発を縮小させたクリーンディーゼル車の販売が急増している。ディーゼルエンジンの圧縮比を低下すれば，ディーゼル車の振動や騒音を抑えられ小型軽量化できることは以前から良く知られていた。しかし，低圧縮比にすると，シリンダー温度が下がりエンジンの始動が難しくなるため，研究開発が必要であった。これを解決したのが燃料噴射を制御するコンピューターである。欧州の自動車メーカーや日本のマツダや三菱自動車がクリーンディーゼル車を販売し，好評を博している。欧州における新車の半分は，クリーンディーゼル車である。クリーンディーゼル車は，低騒音だけでなく燃費向上と窒素酸化物（NO_x）減少と小型軽量化を同時に達成させた。ちなみに，トヨタが欧州で販売するクリーンディーゼル車は，競争相手の独BMWがディーゼルエンジンを供給している。トヨタがクリーンディーゼル車に関して遅れを取っていることは，衆目の一致するところである。

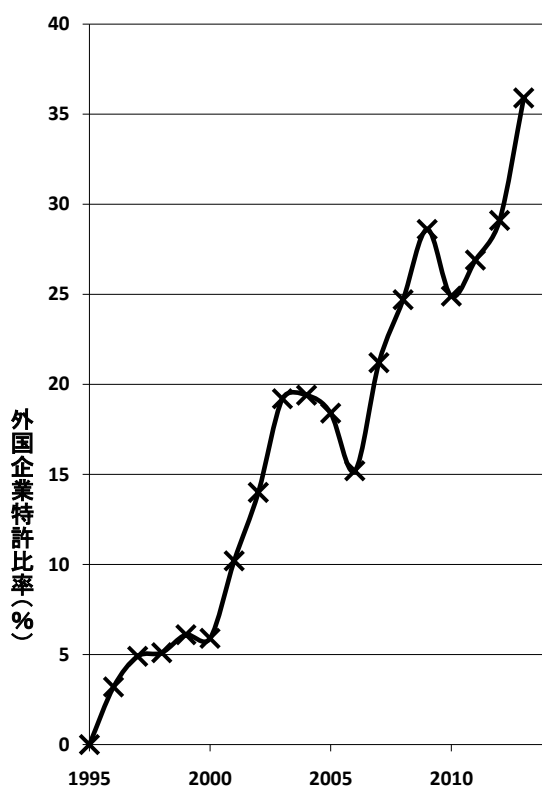


図3 ディーゼル特許における外国企業比率

このような状況の下、完成車メーカーと部品メーカーとの共同研究が活発化しており、各社は非常に興味深い動きをしている。従来の系列を越え、今まで敵や競争相手と考えられていた企業同士が共同研究する様は、自動車業界の特徴であった系列体制の終焉を予感させる。1995年から2013年までの共同研究による特許出願件数は次のようになる。デンソーとホンダとの共同特許件数は35件、パナソニックとトヨタは422件、パナソニックとホンダは73件、パナソニックとニッサンは6件、日立製作所とニッサンは138件、日立製作所とトヨタは29件、日立製作所とホンダは34件、東芝とトヨタは49件、東芝とホンダは14件、東芝とニッサンは8件、NECとトヨタは30件、NECとホンダは22件、ソニーとトヨタは20件、ソニーとホンダは10件、ソニーとニッサンは10件、シャープとトヨタは23件、シャープとホンダは25件、シャープとニッサンは11件、東レとトヨタは32件、東レとニッサンは25件、旭化成とトヨタは17件、旭化成とホンダは12件、ブリヂストンとトヨタは55件、ブリヂストンとニッサンは23件、出光興産とトヨタは10件、出光興産とホンダは28件である。

トヨタの系列会社であるデンソーがホンダと共同研究を行い、トヨタと親しかったパナソニックがホンダやニッサンと共同研究し、ニッサンと長い付き合いの日立製作所がトヨタやホンダとの共同研究を行っている。ソニー、シャープ、東レ、旭化成、ブリヂストン、出光興産も自動車メーカーに拘らず、すべての自動車メーカーとの共同研究を行っている。これらの企業間の共同研究の増加は、系列企業にも影響を与えている。系列企業は、系列以外の自動車メーカーへの接触を積極化し、自社の独自技術を主張し始めている。このような系列企業の系列以外への越境は系列の崩壊を加速する要因となっている。この系列崩壊の根本原因は、自動車のコンピューター化である。このため、系列企業内で調達できる電子部品を系列外企業の電子部品に変更した方が、安価で高品質なものになる場合も多くなった。逆に、系列企業は特定の自動車メーカーの呪縛から解き放たれ、自由に自動車メーカーを選択できるようになった。

2—3 トヨタとデンソーの絶妙な距離感

トヨタの系列企業がトヨタと共同研究開発する比率を比較すると、主要なトヨタ系列企業の中でデンソーが最低である。すなわち、デンソーは他の系列企業のようにトヨタと共同研究を行っていない。トヨタIT開発センターとトヨタの共同研究開発比率（1995年から2013年まで）が81.4%（370件中301件）、豊田中央研究所が32.6%（9153件中2983件）、トヨタ車体が22.2%（3282件中727件）、トヨタ・モーター・エンジニアリングが19.9%（181件中36件）、アイシン精機が14.3%（14017件中1999件）、豊田通商が13.8%（152件中21件）、愛知製鋼が13.6%（663件中90件）、トヨタ紡織が12.7%（3671件中465件）、豊田工機が8.6%（2754件中238件）、豊田自動織機が6.6%（12115件中801件）、デンソーが4.5%（58789件中2650件）である。デンソーの共同研究比率はアイシンの5分の1である。デンソーとトヨタとの間に一定の距離が存在することは間違いな

い事実である。

デンソーは、日本にあるすべての自動車メーカーと共同研究を行い、トヨタ以外の自動車会社と特許を共同出願している。上述したように、デンソーとホンダの共同研究による特許出願は1995年から2013年までの間で35件ある。デンソーとニッサンが1件、デンソーと三菱自動車が22件、デンソーとマツダが20件、デンソーと富士重工業が12件、デンソーとスズキが8件、デンソーとダイハツが36件、デンソーと日野自動車が20件である。これらの共同研究および共同出願は、デンソーがすでにトヨタの系列企業としての頸木を外し終わっていると判断できる。

鈴木博毅によれば、「圧倒的な強さを誇るデンソーに対してトヨタは、重要とみなす部品で競争を挑める技術力がある。電子制御ユニット（ECU）分野の39部品のうちトヨタは10部品を内製し、デンソーやアイシンと競う姿勢を崩さない。技術力を磨くために、トヨタは自ら電子部品を生産する。最近では採用する技術系の人材のうち、約3割が電気系の出身者である。¹³⁾」これは経済原則から考えれば、絶対に許されないことである。世界一の技術力を有するデンソーに研究開発から製造まですべてを委託した方が、トヨタはコスト面で有利なことを百も承知している。

家電は多くても数千点の部品からできるが、自動車は3万点の部品から構成されている。すべてを自社で研究開発し製造することは不可能であり、たとえ可能であっても経済原則に反する。自動車メーカーは、独自開発を自慢し自社開発を推奨してきた歴史がある。ところが、近年の自動車メーカーは、インターフェイスを標準化しグローバル市場から購入するのが常套手段となっている。その流れに逆らうように、トヨタは最も信頼するデンソーにも委託せず、コンピューター制御部品の独自開発を貫こうとしている。

トヨタはデンソーの株式25%を保有し、トヨタの支配下にあるデンソーに戦いを挑むトヨタの姿は無謀に見える。明らかに、デンソーはトヨタが内製するよりも安く製品を納入できる。量産効果を見捨てず、トヨタとデンソーの両社で同じ電子部品を造り続ける理由は何か。これはトヨタの危機感の表れである。トヨタが常にデンソー以上の技術力を維持しなければ、インテルとIBMが主従関係を逆転させIBMがパソコン事業から撤退したように、トヨタとデンソーの力関係が逆転し、トヨタは自動車業界の盟主の座から下野せざるをえなくなると考えるためである。

トヨタは、デンソーと技術開発競争をすると同時に、デンソーなどの系列企業との共同研究開発を積極的に推進している。トヨタの姿勢は、知的財産面で系列企業との連携を強化しており、欧米企業のような部品会社との敵対的関係はない。加えて、トヨタは、デンソーなどの系

13) 鈴木博毅 [2014]「戦略の教室」ダイヤモンド社 「何がトヨタ自動車を成長させているのか？技術革新が速い分野では、イノベーションで製品の強みが失われる変化が起きやすい。企業はイノベーションを起こし続けることでのみ繁栄できる。」

列企業がトヨタ以外の自動車メーカーと共同研究開発することを寛容に、かつ、戦略的に許している。一方、デンソーだけしかできない先端的な部品をトヨタ自身が内製し、デンソーとの技術開発競争を止めようとはしない。これがトヨタとデンソーとの戦略的關係であり、竹馬の友ともあえて競争する関係を築いている。換言すれば、トヨタとデンソーは、外柔内剛の關係であり、外面は柔軟で自由な關係であるが、精神はしっかりと結びついている。この關係がトヨタのイノベーションの源泉であると考えられる。トヨタは、トヨタ自身が系列企業以外との共同研究開発を行い、デンソーなどの系列企業がトヨタ以外の自動車メーカーとの共同研究開発を許すオープン戦略と、トヨタの系列企業も競争相手と見なしてトヨタ単独の研究開発を行うクローズ戦略の両面を巧みに操っていると言える。

トヨタが内製に拘る体質は創業当初からの伝統である。トヨタの基礎を築いた大野耐一の言葉「仕事というのは一旦出してしまったら、二度と自分のところには取り戻せない。そういうつもりで内外製を決めなければならない。¹⁴⁾」のように、トヨタの内製への異常なまでの執念を感じることができる。この言葉は、トヨタ自身が製造できない製品を外注会社から購入し、それらを組み立てるだけの完成車メーカーに墮落すれば、いつかトヨタが潰れるという危機迫るトヨタ哲学である。

筆者は製鉄会社に勤務していたとき、自動車用の高強度材料（従来鋼の5倍の強度で価格は2倍）を開発し、トヨタに提案したことがあった。その時のトヨタの経営判断は内製を重視する哲学に満ち溢れていた。トヨタは、提案した高強度材料を本格採用する見返りとして、トヨタが特許使用料を支払うことなしにトヨタの系列会社に、その半分を製造させる条件を提示してきた。トヨタはトヨタの系列会社に製造させることを「内製化」と言っていた。トヨタとの資本關係もない筆者の会社だけが新しい技術を握ってしまうことを、トヨタが極端に恐れていることを肌で感じ取った。

ところで、細胞分裂や生殖による自己増殖機能は、人間などの生命体だけが有する特別の能力であった。しかし、現代の工場では最先端のコンピューターを駆使したロボットが新たなロボットを作っている。これは、生命体ではないロボットが自己増殖機能を持ったことに等しい。

14) 岩月伸郎 [2010]「生きる哲学トヨタ生産方式」幻冬舎新書 「新たに生産場所を決める場合、ここで外注化は相当やっかいでした。「まったくの新規部品を立ち上げます。については諸般の状況を検討の上、外注に出します」という提案はなかなか承認されない。最も大変なのは、「現在、内製で実施しているものを外注化します」という場合。これはほとんど不可能に近い。なかでも絶対と断言できるほど、通らないケースがありました。「内製よりもコストが安いので、外注に切り替えます」このような理由が付けられた提案を上げようものなら、徹底的に叩かれました。大野さんの考え方は「仕事というのは一旦出してしまったら、二度と自分のところには取り戻せない。そういうつもりで内外製を決めなければならない」ということでした。」

さらに、ロボットの人工知能は、人間の知能を凌駕する領域を拡大している¹⁵⁾。将棋などのゲームや知識を問うクイズでは人間を遥かに越える能力を習得している。人間ではなくコンピューターが運転するロボット自動車は、人間のミスによる自動車事故を皆無にし、我々の世界から交通事故を忘れさせる可能性が高い。トヨタは、この近未来を確実に理解しており、その主役はデンソーではなくトヨタであり続けたいと考えている。そのため、あえてデンソーのコンピューターを駆使した最先端の電子部品をトヨタ自身が内製する茨の道を歩んでいると考えられる。

コンピューターと人間が融合し、その境界が不明瞭になる時代はすぐそこに迫っている。近い将来、人間の意識だけをコンピューターに移して無限に生き続ける生命体が出現する。この生命体は従来の定義では人間ではないが、明らかに人間の意思で考え行動する。このとき人間とコンピューターを線引きすることは極めて難しい仕事となる。人間の意思を持ったコンピューターが運転する自動車事故の責任は誰にあるか、人間の意思を持ったコンピューターが書いた著作権は誰のものか、人間の意思を持ったコンピューターが手術した医療トラブルは誰の責任か、などの難問が待ち構えている。コンピューターの活用が次世代自動車のキーテクノロジーになることは衆目の一致するところである。そうなれば、デンソーの得意とするコンピューター技術は、今以上に重要性を増し次世代自動車の必須技術になることは間違いない。しかし、この面でもトヨタは抜きでなく、人工知能などの研究開発を行い、数多くの特許出願をしている¹⁶⁾。

ところが、トヨタのコンピューター制御への異常なまでの拘りに異論もある。塚本潔は「トヨタは他社に比べコンピューター化の依存度が極端に高い。コンピューター制御が長所でありアキレス腱でもある。¹⁷⁾」と指摘している。確かに、トヨタはニッサンやホンダに比べ、コンピューター制御の研究開発は群を抜いており、コンピューター制御に関する特許出願も格段に多い。トヨタのコンピューター依存が強すぎるため、トヨタのハイブリッド車がホンダに比べ高性能であるが高コストである問題、コンピューターのソフトウェアのトラブルによるリコール問題、ドライバーの遊び心をコンピューターが奪い取る問題など、さまざまな問題がトヨタに問いかけている。それでも、トヨタは、デンソーとの絶妙な距離感を保ちつつ、自動車のコ

15) ジョージ・ビーム著、林信行訳 [2014] 「Google Boys」三笠書房 「使う側がいちいち指示しないと作業ができないようでは困る。コンピューターに任せておけば、きちんと結果をだしてくれるようでない。人工知能は、こちらの求めるものを完璧に理解して、正しい答を与えてくれる。グーグルの夢は創業時から変わらない。人が無意識に知りたいと思っているものを、あえて検索しなくても見つけられる世界を実現することだ。」

16) トヨタ自動車の人工知能特許：特許公開2008-230303「駆動力制御装置」、特許公開2008-168733「運転指向推定装置」、特許公開2008-74261「運転指向推定装置」など

17) 塚本潔 [2010] 「電気自動車ウォーズ」朝日新聞出版

シミューター化を前面に打ち出し果敢に挑戦続けている。

3 章 電気自動車のイノベーション

3—1 地球環境問題と電気自動車

毎年64億トンの二酸化炭素が排出され、海と森が吸収してくれた残りの34億トンの二酸化炭素が毎年増加している¹⁸⁾。そのため、地球は急激に温暖化し、さまざまな問題が発生している。ガソリン車のエネルギー効率は、改善したとは言え未だ20～30%で市街地では10%に留まる。この非効率性はガソリン車がガリソンを無駄遣いしていることを物語っている。発電所から電気自動車に充電されるまでの送電損失と充電損失と、電気自動車内のモーターやインバーターの電力損失を考慮しても、電気自動車のエネルギー効率はガソリン車の2倍程度と優れている。

現在、世界で11億台の自動車が走っているが、中国を中心に自動車が急増し2020年には15億台になると予想される。世界の新車は、現在の年間9000万台から年間1億台を突破することは確実な状況である。人間は、数億年かけて作られた石油をたった100年で使い切ろうとしている。サトウキビをアルコールに変えて燃料にするバイオフューエル車は、ブラジル以外で普及する目処は立っていない。そこで、ガソリン車から電気自動車への転換は是非とも推進したいと誰もが考えている。

ガソリンエンジンの最大トルクは数千回転が必要であり、最大トルクを発揮するため6段変速などのトランスミッション（動力伝達装置）が必要となる。一方、電気自動車は、モーター回転が始まれば大きなトルクが得られ出足性能に優れており、トランスミッションが不要である。ガソリン車で後退するにはリバースギアが必要であるが、電気モーターでは電流を逆に流せば逆回転するため、リバースギアが不要である。ガソリン車でエンジンプレーキを使う時は、電気自動車では回生ブレーキが働き充電できるため、さらに燃費効率が良くなる。電気自動車は、エンジンもプラグもラジエーターもエキゾーストパイプも必要ない。このように電気自動車はガソリン車に比べ部品も無駄も少ない。

オランダで電気自動車が発明されたのは1834年であり、1886年にドイツのベンツがガソリン車を発明する前であった。ガソリン車よりも50年も前に発明された電気自動車を、誰が180年間という長い時間塩漬けにしたのか。その主犯は社会の反対勢力である。電気自動車になれば

18) 西川尚男 [2013]「新エネルギーの技術」東京電機大学出版局 「海洋からの二酸化炭素の放出は年906億トンで、海洋への二酸化炭素が922億トンの溶け込み、毎年16億トンが海洋に吸収される。植物土壌からの二酸化炭素放出は1196億トンで、植物の光合成で二酸化炭素が1226億トン消費され、森林へ毎年14億トンの二酸化炭素が吸収される。すなわち、二酸化炭素64億トンが排出されるが、海洋と森林の吸収した残りは34億トンとなる。」

ガソリン車が減少し，社会に根付いた化石燃料のインフラで潤っていた企業やそこで働く人々が，既得権を守るため電気自動車に反対した。ちなみに，英国で蒸気自動車が最初に実用化されたとき，安全のため蒸気自動車の前で赤旗を持った人が先導することを義務付ける馬車団体の蒸気自動車反対運動が起きている。民主主義の多数決の原則が，電気自動車の普及を妨げ，180年間という途方もない時間をかけさせたと言える。最近，待ちに待った電気自動車がやっと産声を上げた。ところが，ニッサンのリーフや三菱自動車のアイミーブなどの電気自動車の販売は予想を下回り，普及とは程遠い販売台数に留まっている。これは電気自動車の普及に反対する社会勢力が今の日本では大勢を占めているためである。ガソリン車に引導を渡し電気自動車にバトンタッチさせるのは，トヨタやホンダやニッサンの自動車メーカーではなく，地球環境を最優先と考える社会である。日本の社会が電気自動車を待ち望まなければ，電気自動車は我々の下には来てくれない。独BMWが電気自動車を選択した理由は，最先端の環境技術を駆使することが独BMWのブランドイメージを向上させ，社会の変化を加速すると考えるためである¹⁹⁾。

電気自動車の走行時には二酸化炭素は排出されない。しかし，電気自動車に充電する電気は発電所で作られる時に二酸化炭素を発生させる。発電所で発生する二酸化炭素は従来のガソリン車の二酸化炭素に比べ少なく，電気自動車の二酸化炭素の排出量はガソリン車に比べ約75%削減される。これは電気自動車に使用されるリチウムイオン電池の技術進歩が寄与している。リチウムイオン電池は，出力密度が大きく，充電効率が高く，自己放電が極めて小さい特長を持っている。リチウムイオン電池の技術進歩は，パソコンや携帯電話や家電に頻繁に使用されるようになったためであり，その量産効果が技術の向上と製造コストの低下をもたらした。これが電気自動車を180年間の眠りから目覚めさせた主役である。

ところが，東日本大震災以降，日本では原子力発電所が停止し，太陽光発電や風力発電などの自然エネルギー利用が予定通りに進まず，ほとんどの電力が化石燃料から製造されるようになった。その結果，電気自動車の二酸化炭素の削減効果が以前よりも少なくなっている。ニッサンがトヨタやホンダよりも電気自動車に固執する理由は，ニッサンとルノーとの関係にある。ルノーのあるフランスではほぼ100%が二酸化炭素を排出しない原子力発電であり，フランスで電気自動車指向が強いのは当然と言える。さらに，フランスは，理工系人材やエンジニアを重要視する国として知られ，見た目だけが良い高級ブランドの自動車には目もくれず，最先端の電気自動車やクリーンディーゼル車に強い拘りを持つ国である。ちなみに，日本の発電は，

19) [2014]「次世代自動車2014」日経ビジネス 「BMWはEVに技術を惜しみなく投入しブランド力を高める。炭素繊維は，アルミより3割，鉄より5割軽い。ドイツの炭素繊維メーカーSGLカーボンと提携，米国に工場を新設。大量の電力が必要になる炭素繊維工場を湖畔に建設し，水力発電で全電力を確保，ライプチヒ工場は風力発電だけで電力を賄う。」

二酸化炭素を排出する化石燃料に90%を依存している。ルノーの影響を強く受けたニッサンが電気自動車に傾倒することは容易に理解できる。しかし、原発を停止し化石燃料に頼らざるを得ない日本の電気自動車は同じ論理は通じない。さらに、天然ガスが豊富な米国西部やロシア、石炭が豊富な米国東部やドイツなど、国や地域ごとに、電気自動車を望む声には温度差が大きい。今の日本で、電気自動車が優先されるべきか、疑問視する声も少なくない。

3—2 電気自動車の課題とその対策

図4は、トヨタ、ホンダ、ニッサンの電気自動車に関する研究開発比率の推移である。ニッサンは、2012年に研究開発の16%を電気自動車に集中させ、全社を挙げて電気自動車に命運をかけていることが分かる。また、電気自動車を販売していないトヨタも、ニッサンに引けを取らない研究開発比率である。これは、トヨタのハイブリッド車やプラグイン・ハイブリッド車の要素技術の研究開発と、電気自動車の研究開発が近接しているためである。トヨタはニッサンのように電気自動車を製造できる技術力を有していると考えられる。ただし、700万台販売

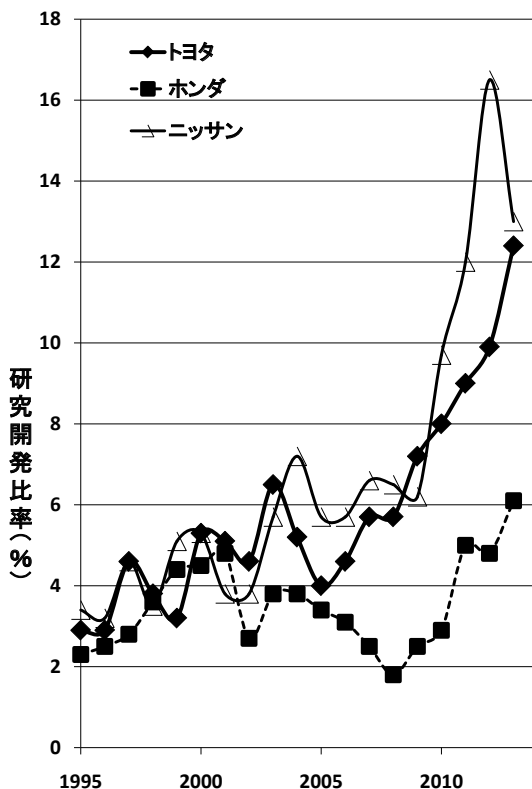


図4 電気自動車の研究開発比率の推移

されたトヨタのハイブリッド車はニッケル水素電池を使用しており（トヨタのプラグイン・ハイブリッド車はリチウムイオン電池を使用），電気自動車のためのリチウムイオン電池の製造体制は未だ不透明である。ホンダは，ニッサンやトヨタに比べ，電気自動車に関する研究開発比率が極端に少なく，もし電気自動車が次世代自動車の本命になれば，ホンダは大きく出遅れる可能性がある。

図5は，デンソー，アイシン，豊田中央研究所，豊田織機，豊田合成，ダイハツなどのトヨタ系列企業の電気自動車の研究開発と，トヨタと系列企業との電気自動車の共同研究開発と，トヨタ単独での電気自動車の研究開発を合算した公開特許件数である。トヨタ系列企業単独とトヨタと系列企業の共同研究開発の合計が，トヨタ単独の研究開発（58%，10524件中6094件）とほぼ同じである。すなわち，トヨタファミリー全体の電気自動車開発に注がれるエネルギーは，ニッサンを遥かに越えていると言っても過言ではない。翻って，このように電気自動車の研究開発が多い事実は，電気自動車が未完成なものであることを示している。

電気自動車の課題は次の6点である。①電気自動車の価格が高い問題，②走行距離が短い問

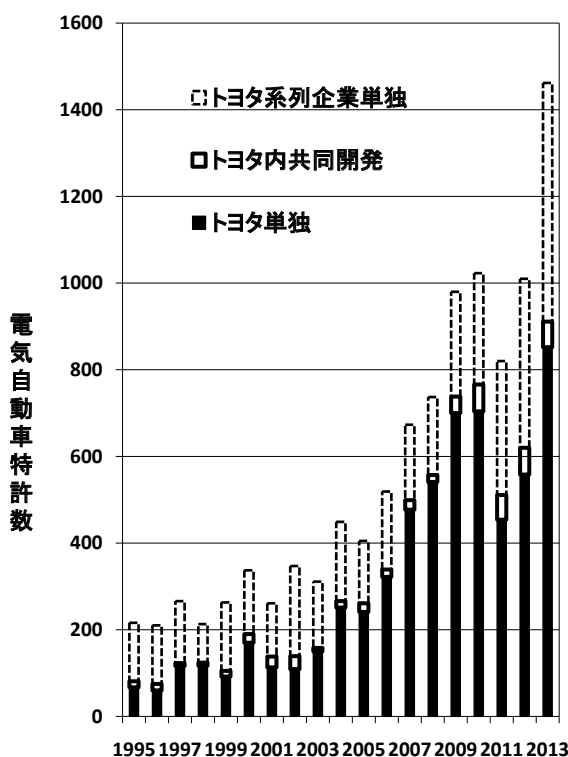


図5 電気自動車の研究開発におけるトヨタ系列企業の寄与（デンソー、アイシン、豊田中研、豊田織機、豊田合成、ダイハツ等）

題、③燃料供給の充電時間が長い問題、④急速充電のスーパーチャージャー・ステーションが少ない問題、⑤希土類金属ネオジウムなどの磁石材料が偏在する問題、⑥石油会社が電気自動車に猛反対している問題があり、これらは電気自動車の普及を妨げている。

3—2—1 電気自動車の価格が高い問題

電気自動車の価格が高い理由は、リチウムイオン電池が高価なためである。電気自動車が普及すれば量産効果が期待でき低価格化は不可能ではない。電気自動車の普及と電気自動車の低価格化は、卵が先か鶏が先かの関係であり、この壁を越えない限り電気自動車の未来はない。ニッサンの電気自動車リーフの価格は287万円である。トヨタのプリウスが223万円であり、電気自動車はハイブリッド車に比べ約60万円高い。二次電池、ガソリンエンジン、モーター、それらを使い分けるコンピューターを積み込んだ部品点数の多いハイブリッド車よりも、電気自動車の価格が高くなるのは、電気自動車専用の高価な二次電池が原因である。

自動車会社は電気自動車専用の大容量バッテリーの研究開発を行っている。しかし、テスラ・モーターズは、電気自動車専用の電池ではなく、パソコンや携帯電話のリチウムイオン電池を7000個集めて、それを制御するソフトウェアを作り、電気自動車を造った。パソコンや携帯電話のリチウムイオン電池はすでに大量生産され、低価格で安定的に入手可能である。しかし、トヨタやホンダの自動車メーカーはその手法を採用できない。テスラ・モーターズの手法が主流となれば、トヨタやホンダが今まで築いてきた自動車メーカーとしての技術開発力は簡単に吹き飛んでしまうことになる。また、携帯電話の寿命は3～4年であるが、電気自動車の寿命は10年程度必要であり、さらに自動車は悪路や悪天候などの過酷な環境条件で使用されるので、高い信頼性と安全性が必要となる。前者のテスラの手法を採用できない事情がトヨタやホンダの本音で、後者の寿命や環境の違いが建前である。テスラ・モーターズの電気自動車の信頼性は、時間が経たないと判定できない。

このパソコンや携帯電話のリチウムイオン電池をそのまま自動車に使用する発想は、トヨタ等を驚かせたことは間違いない。豊田章男社長はテスラ・モーターズのイーロン・マスク会長に面談した際、その技術を高く評価し、50億円の資金援助を行った²⁰⁾。パソコンや携帯電話のリチウムイオン電池を電気自動車に使用する発想がトヨタから出てこないことに最も落胆した

20) 竹内一正 [2013]「イーロン・マスクの野望」朝日新聞出版 「2010年5月21日、カリフォルニア州シュワルツネッガー知事の立ち会いの下、イーロンとトヨタ自動車の豊田章男社長は、電気自動車の開発に関する業務提携をこの場で発表した。テスラはトヨタから5000万ドル(約50億円)の出資を受けることになった。豊田章男社長は「高い技術力、モノ作りにかける強い思いや、ひたむきな姿勢に、テスラ社の無限の可能性を感じた」と言っている。テスラ社は、IHNUMMI工場を4200万ドルで買い取り、モデルSを生産すると決断した。」

のは、豊田章男社長自身であったと考えられる。2014年パナソニックは、テスラ・モーターズと米国に大規模電池工場を建設することで合意した²¹⁾。トヨタのハイブリッド車のニッケル水素電池を共同開発したパナソニック（パナソニックEVエナジー）は、今度は逆に、トヨタの敵となるテスラ・モーターズと組んで、リチウムイオン電池の生産を始める。これは、リチウムイオン電池がこれまでのデジタル家電用途から自動車用途へターゲットを転換したことを表している。また、これは、リチウムイオン電池の低価格化、ひいては電気自動車の低価格化につながると考えられる。

テスラ・モーターズは、2014年6月、自社が保有する電気自動車関連の特許を開放すると発表した^{22, 23)}。技術を開放することで電気自動車への新規参入を誘導し、量産効果で電気自動車部品の低価格を狙う戦略である。テスラ・モーターズのモデルS（年間販売目標2万台、走行距離480km、最高時速210km）は2013年カー・オブザイヤーを受賞し、タイム誌の2012年ベスト発明25に選ばれた。しかし、年間2万台は、量産効果を期待するにはあまりにも少量であり、電気自動車のコストダウンへの道はまだ遠い。

テスラ・モーターズの特許の開放はトヨタに衝撃を与えた。今までの自動車業界の常識は、特許こそが研究開発の砦であり、特許で他社の模倣を防御し、特許で他社を攻撃することであった。研究者の血のにじむ努力と貴重な研究開発費を使いやっと手に入れた最先端の特許を競合他社が使用できるようにすることは、トヨタの哲学には存在しない。また、独BMWが電気自動車i3を発売した²⁴⁾。独BMWが得意とする炭素繊維強化プラスチック（CFRPは、鉄の重量の4分の1で強度は10倍）を贅沢に使用した軽量ボディの電気自動車は500万円と比較的安価であった点がトヨタを驚かせた。以上のような独BMWやテスラ・モーターズの電気自動車が、トヨタに燃料電池車の発売を急がせたことは間違いない。

米カリフォルニア州の無公害車（ZEV）規制は、電気自動車などの無公害車の販売台数が規制以下になるとペナルティーを科している。そこで、電気自動車のない自動車会社は、テスラ・モーターズからクレジットを購入しなければならない。そのため、テスラ・モーターズは、GM、クライスラー、ホンダからクレジット代として多額の金を得ており、この金を電気自動

21) 日経新聞2014年9月25日

22) 日経ビジネス2014年9月29日 「イーロン・マスクは、特許開放が継続的なイノベーションを生むと考えている。」

23) 日経新聞2014年8月12日 「米国電気自動車メーカーのテスラ社が自動車ビジネスの常識を破っている。技術革新を促す特許開放などIT産業の手法を採用。技術の公開で外部者や部品メーカーなどの協力を呼び込む戦略で、ソフトウェア業界の手法をものづくりの世界に持ち込んだ。」

24) 日経ビジネス2014年10月27日 「CFRP炭素繊維強化プラスチックを使用したBMW i3 電気自動車は500万円弱と格段に安い。CFRPの加工工程を自社で手掛けることでコストを極力抑えた。」

車の製造に活用すれば、電気自動車の低コスト化を加速できると考えられる。

3—2—2 電気自動車の走行距離が短い問題

電気自動車の走行距離が短い理由は、高価なリチウムイオン電池を限定的に搭載していることで電池容量が限られるためである。電気自動車が普及すれば量産効果で電池が安価に製造でき走行距離も長くなることは間違いない。ニッサンの電気自動車リーフの走行距離は230kmである。夜間のヘッドライト、雨天のワイパー、冬のヒーターを使用すれば、走行距離はこの数字を大幅に下回る。ちなみに、トヨタのプリウスの走行距離は1370kmであり、電気自動車の走行距離は極端に短い。この走行距離問題はドライバーから電気自動車が敬遠される最大の理由である。テスラ・モーターズの電気自動車ロードスターの走行距離は480kmであり、忍耐強い人ならば走行距離問題を何とか解決する電気自動車であると言える。この電気自動車は、リチウムイオン電池を7000個も搭載しているため車体重量が1235kgと重いが、最大出力288馬力、最高時速210kmで高速性能もガソリン車に引けを取らない性能を確保している。このように巨大な電池を搭載する自動車は、小型軽量がエコカーと信じる日本の社会で普及するには時間がかかると考えられる。しかし、この電気自動車は、走行中まったく二酸化炭素を排出しない自動車であり、正真正銘のエコカーである。これは、日本の自動車メーカーが歩んできた道ではないところに、正解が隠れている可能性を示唆している。

現状では、自動車の電力の約20%はシリコンのパワー半導体が消費している。シリコンに代えてシリコンカーバイドを用いたパワー半導体を使用すると、消費電力が約10分の1になり、その電力を電気自動車の走行に利用できるため、走行距離が長くなる²⁵⁾。トヨタは、電気でモーターを回転させるハイブリッド車や燃料電池車やプラグイン・ハイブリッド車に、シリコンカーバイドのパワー半導体を使うと表明している。これを電気自動車に適用すれば、電気自動車の走行距離は20%程度向上する。

インバーターは電気自動車の直流を交流に変換し、交流の周波数を変化させることでモーターの回転数を変える。パワー半導体によるインバーターの高性能化は走行性能の向上に寄与する。将来、シリコンカーバイドを超える性能を持った酸化ガリウム GaO_2 が実用化されれば、さらにシリコンカーバイドの10分の1の消費電力になる可能性がある²⁶⁾。また、各社が研究開

25) 西川尚男 [2013]「新エネルギーの技術」東京電機大学出版局 「シリコンカーバイド (SiC) に変えることにより、順方向の電圧低下を大きく低減でき、消費電力を約1/10に向上させる半導体素子が開発された。このシリコンカーバイドは、炭化珪素粉末を加熱して気体にしたものを再結晶化して製造する。」

26) [2014]「次世代自動車2014」日経ビジネス 「SiC炭化珪素インバーターから酸化ガリウムに転換すると、モーターやインバーターを小型化できる。 GaO_2 酸化ガリウムは高耐圧で低損失なパワー半導体が安価に作成可能にし、低損失の指標とされるバリガ性能指数はSiCの約10倍と大きい。」「ポストリチウムイオン電

発で鎬を削っている全個体電池やリチウム空気電池やナトリウムイオン電池は、現状のリチウムイオン電池の性能を飛躍的に向上させ、電気自動車の走行距離問題を一挙に解決できる可能性がある²⁷⁾。トヨタの本音は、この段階で電気自動車を本格投入したい。しかし、上記の次世代二次電池の研究開発に手間取れば、トヨタはリチウムイオン電池の電気自動車を仕方なく販売することも視野に入れている。

ところで、電気自動車の走行距離問題を解決する方法として、超小型ガソリンエンジンを搭載した電気自動車がある。高価なリチウムイオン電池の代わりに、超小型ガソリンエンジンで充電し走行距離を延ばす電気自動車は、レンジエクステンダーと呼ばれている。これは、小さなエンジンがあるが、100%電気エネルギーで走る電気自動車であり、走行距離問題がまったくない。

電気自動車の車体重量を軽量化することで走行距離を向上させる動きも活発である。独BMWは電気自動車の軽量化のため炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を採用した。世界シェアの70%を日本企業(東レ、帝人、三菱レイヨン)が占めるCFRPの自動車への採用は、日本の自動車メーカーに追い風となる。なかでも、東レは米ボーイング社の飛行機の機体に採用されており、飛行機の燃費向上を実現した実績がある。電気自動車の車体は高張力鋼板からCFRPに移ることは間違いない。東レは、日本のCFRP製造能力を凌駕するCFRP工場を米国に建設中であり、これが本格稼働すれば米国自動車メーカーの方がCFRPの調達では有利になる。電気自動車の走行距離問題から端を発した自動車の超軽量化は、自動車メーカーによるCFRPの獲得競争になる可能性が高い。このような努力にもかかわらず、電気自動車は寒くなると、二次電池の放電量が多くなり、さらにヒーター使用で大量の電気が消費され、走行距離が極端に短くなる。寒冷地向けの電気自動車の走行距離対策が最後に残る課題である。

✓池の開発が活発化。現状のEV向けリチウムイオン電池のセル単体でのエネルギー密度は60~140Wh/kg。これは小型EVに1回の充電当たり160km程度しか走行できない。エネルギー密度は300Wh/kgにすれば300km走行可能に。Si系負極材料は理論的に黒鉛材料に比べ約10倍の容量、Siは充放電時の膨張・収縮が大きすぎて寿命が問題。大阪チタニウムのSiOなどのSi系酸化物の負極材料の容量は黒鉛の5倍。固体電解質を用いた全固体電池や1価のリチウムではなく2価のMg, Al, Caを用いた多価カチオン電池が期待されている。」

27) 鶴原吉郎、仲森智博 [2014]「自動運転」日経BP社 「リチウムイオン電池のエネルギー密度を高める新しい電極材料として期待されているのが硫黄系、シリコン系の材料。現在のリチウムイオン電池は、正極材料として、主にマンガンやニッケル、コバルトの酸化物とリチウム化合物、負極材料として炭素が使われている。これに対して、正極材料にリチウムと硫黄系化合物を、負極材料にシリコン・酸素・炭素の化合物を組み合わせることで、理論的には1kg当たり400~500Whと、現在の3割以上のエネルギー密度を達成できる可能性がある。」

3—2—3 電力供給のための充電時間が長い問題

電気自動車を家庭の200vで充電すると約4時間、急速充電しても約30分間が必要であるのに対し、競争相手の燃料電池車は約3分間で水素供給が可能であり、充電時間は電気自動車の大きな問題である。日本経済新聞²⁸⁾によれば、トヨタと東北大学は、充電時間を10分の1に短縮する全固体電池を開発した。トヨタと東北大学は、真空装置を使い電解質と電極を密着させ、リチウムイオンが電池内を移動しやすくし、充電時間を10分の1に短縮することに成功した。この全固体電池を使えば、ガソリン車や燃料電池車とほぼ同じ3分程度になるため、電気自動車の充電時間問題が解決する。しかし、これはまだ研究段階であり、実用化までには少なくとも数年の開発期間が必要である。

電気自動車の車体価格はリチウムイオン電池が約半分を占めている。そこで、ニッサンは電池を切り離して車体本体のみを販売するアイデアを持っている。具体的には、電池のない電気自動車だけを購入してもらい電池だけをリースする。この電池リース方式は、電池交換時間が2分以内で可能で、電気自動車の充電時間問題を一挙に解決できる。これは、トヨタが一番恐れる自動車コモディティ化であり、電池だけをリースする電気自動車が、自動車のコモディティ化の火付け役になる可能性が高い。この電池交換のアイデアの成否はインフラ整備にある。急速充電のスーパーチャージャー・ステーションの建設も遅々として進まない現状では、電池交換のインフラは絶望的な状況にある。しかし、テスラ・モーターズは電池を丸ごと交換すると90秒で充電完了できるとし、その希望を捨てていない。また、テスラ・モーターズは充電する電気代をすべて無料で提供するサービスも開始している²⁹⁾。

3—2—4 スーパーチャージャー・ステーションが少ない問題

電気自動車の走行距離が短いにも関わらず、急速充電のスーパーチャージャー・ステーションが未だに不十分で安心して遠乗りできない状況にある。現在のスーパーチャージャー・ステーションは、ガソリンスタンド3万4700箇所比べ、約2000箇所と少ないが、2015年3月までに6000箇所に増やす計画である。しかし、1箇所に1台の急速充電器が設置される場合がほとんどである。たった1台の充電器に数台の電気自動車が行列すれば、充電に2～3時間かかることになり、電気自動車の普及に水を差すことは間違いない。

米クアルコムは独自の無線技術を利用したワイヤレス充電技術を有している。これが実現できれば、電気自動車が走行中に充電できるようになり、急速充電のスーパーチャージャー・ス

28) 日本経済新聞2014年12月9日

29) 竹内一正 [2013]「イーロン・マスクの野望」朝日新聞出版 「高速充電ステーション（スーパーチャージャー・ステーション）を全米に設置する。2014年、北米の人口の80%の都市をカバーする。」

ーション問題は解消される³⁰⁾。これは携帯電話で培った無線技術を電気自動車の充電に応用したものである。クアルコムが携帯電話やスマホで主導権を握っている理由は、無線技術に関する基本特許を多数保有しているためである³¹⁾。ワイヤレス充電のための周波数85kHz帯は日本とドイツと米クアルコムが主張するものである。ただし、走行中のワイヤレス充電の電力伝送効率は65%程度と低い。停止時の電力伝送効率は80%と高いため、当面、停止時のワイヤレス充電が主流になる。

しかし、電気自動車が本格的に普及し、昼間に急速充電が行われると、間違いなく電力供給不足に陥る。電気自動車のための安定した電力供給体制を整備するためには、電力会社は莫大な設備投資が必要になることも看過できない。たとえば、日本で走る6000万台の乗用車がすべて電気自動車になれば、日本の発電所を現在の数倍に増加させなければならない。原発が停止する中、火力発電所や水力発電所などの増設は、住民の反対運動が大きくなることが予想され、日本社会のコンセンサスが必須となる。

3—2—5 希土類金属ネオジウムの偏在問題と石油会社の反対問題

電気自動車は、ネオジウム磁石を使った永久磁石式モーターを使用する必要がある。ネオジウムの希土類金属は中国に偏在しており、中国がレアメタルの輸出禁止を行うと電気自動車を製造できなくなる。そのため、ネオジウム以外の磁石材料開発や希土類金属を削減した磁石材料の開発が進んでいる。特許公開2014-157845日立製作所「磁石材料」、特許公開2014-105796デンソー「クラッチ機構およびクラッチ機構用の永久磁石の製造方法」、特許公開2013-175705トヨタ「希土類磁石の製造方法」、特許公開2012-228072三菱電機「永久磁石型回転電機およびその製造方法」、特許公開2010-263093日立製作所「永久磁石材料」は、いずれもネオジウムなどの希土類金属を削減、または、皆無にする特許である。これらが実用化すれば、安定的に電気自動車を供給できる。

石油は自動車や飛行機や船の動力源として、約半分が輸送用に消費されている。その他、火力発電用に12%、暖房や調理用コンロなどの民生用に14%、化学原料用に21%消費されている。なかでも自動車用のガソリンは、石油会社の主力製品になっている。電気自動車が売れ過ぎる

30) 日経新聞2014年9月25日 「欧州でEV自動車の普及に向けた自動車メーカーの提携が相次いでいる。独BMWと独ダイムラーがワイヤレス充電の技術開発で提携。充電インフラの相互乗り入れも進む。両社は、競合であってもEVの市場開拓には協力の余地があるとしている。」

31) 鈴木博毅 [2014] 「戦略の教室」ダイヤモンド社 「携帯チップのクアルコムは、無線通信技術、CDMA方式やLTE方式の特許を広く押さえ、CDMA携帯電話用チップのほぼ100%、スマホのプロセッサの半分近いシェアを握っている。ここにPC向けプロセッサの王者、インテルの影はない。クアルコムは製造機能を持たず、技術開発に特化し、その特許使用料、外部製造によるチップ販売で収入を得ている。」

とガソリン車が売れなくなり、ガソリンの売り上げに依存する石油会社は死活問題となる。そのため、石油会社は電気自動車に猛反対の姿勢を崩さない。反面、電力会社は電気自動車の普及を後押ししており強力な味方になっている³²⁾。

トヨタが電気自動車をできるだけ回避し時間稼ぎしたい事由がもうひとつある。それは外国主体のリチウムイオン電池メーカーの存在である。現在のリチウムイオン電池メーカーの世界シェアは、サムスン25.1%、パナソニック20.7%、JG化学16.2%、その他が中国の天津力神、ATL社である。もし電気自動車が主流となれば、トヨタはリチウムイオン電池を外国の部品メーカーから大量購入する事態に陥ることは必定である。トヨタは、次世代自動車の主導権を外国のリチウムイオン電池メーカーに、ほんの一時でも渡したくないと考えている。

日本で電気自動車を販売しているのは、ニッサンと三菱自動車である。一方、トヨタとホンダは電気自動車よりも燃料電池車に傾注している。その理由は、上述のような充電時間問題や走行距離問題がある電気自動車が未熟な商品であり、自信を持って販売できる段階ではないと考えているためである。スーパーチャージャー・ステーションのインフラの遅れも、トヨタとホンダに電気自動車への参入を躊躇させる原因である。ニッサンの渡部英明は、「ニッサンはただか自動車メーカーでしかない。我々だけでインフラを構築することはできません。ニッサンがリーフを出すことで人々に刺激を与え、電気自動車が受け入れられる社会ができてくると思う。」と述べている。さらに、原発が停止した今の日本では、電気自動車が使う電力を発電する過程で大量の二酸化炭素が排出されている。先に発売した電気自動車はニッサンに任せ、トヨタは燃料電池車に勢力を投入する考え方は十分理解できる。

1911年、アムンゼンは北極を目指すための資金や資材の準備中に、クックやピアリーによる北極点到達の知らせを耳にした。アムンゼンは、すでに踏破された北極ではなく、前人未到の南極に目的地を変更した。北極が電気自動車で、南極が燃料電池車に置き替えると理解しやすい。南極は北極より気温が低く高い山があるため、極めて厳しい環境である。ニッサンの電気自動車の発売は、トヨタの虚を衝いたと考えられる。そこで、トヨタは、電気自動車に比べ、燃料電池車が数段に厳しい開発であることを承知しながら、あえて難しい燃料電池車の開発に方針転換したと考えられる。上述したように電気自動車用のリチウムイオン電池の性能が飛躍的に向上する可能性もある。もし電気自動車が普及すれば、量産効果で低価格の電気自動車の製造が可能になり、相対的に燃料電池車の存在価値が薄れることは異論のないところである。このような状況でも、トヨタは、燃料電池車という前人未到の地への歩みを止めない。

32) 日経ビジネス2014年10月13日 「米国の電力会社を救うのはEVである。米国のエネルギーに関連する支出は、電力代の10億ドル（約1100億円）と、車の燃料代の14億ドル（1500億円）である。EVこそが電力需要をもたらし、かつ環境目標を達成可能になる。」

4 章 燃料電池車のイノベーション

4-1 エネルギー問題がもたらす内燃機関の終焉と燃料電池車の登場

宇宙や人間を支配するものはエネルギーである。エネルギーは高い方から低い方に流れ、差異がなければエネルギーは生じない。ちなみに、山がなく平地の多いオランダでは、水車は機能せず、風車エネルギーに頼るしかなかった。エントロピーは、高速で動くものを遅くし、秩序あるものをカオス（無秩序）に導き、エネルギーを放出し最終的には消滅する。その論理から化石燃料に強く依存した現代社会は必ず消滅する。消滅する前に、化石燃料からの脱却を試みる努力が行われている。しかし、皮肉にも人間が作り出した自動車などの機械が放出する二酸化炭素は、すべての動物の放出量を遥かに上回っているのが現状である³³⁾。

古くは木材がエネルギー源であった。産業が活発になると薪炭消費が急増し森林が破壊された。その理由は、煉瓦、製塩、製鉄、ビールなど、当時の主力産業には薪炭が必要であったためである。ちなみに、スウェーデンは鉄鉱石が豊富に採れるにもかかわらず、薪炭不足で溶鉱炉の閉鎖を余儀なくされている。薪炭不足の危機を救ったのが、石炭や石油や天然ガスなどの化石燃料であり、産業革命の立役者は石炭であった。エネルギーを支配した者が世界を制することを明確に示したのが、第二次世界大戦であった。日本は石油エネルギーを求めて東南アジア諸国に進出した。当時、豊富な石油エネルギーを有していた米国が勝利し、石油をほとんど入手できなかった日本は手痛い敗戦を経験した。現在でもエネルギーを持つ国と持たない国との従属関係は明白であり、各国はより安価で安定したエネルギーを追い求めている。

米国はロシアを抜き世界一の天然ガス生産国になった。これはシェールガス（天然ガスの一種）の増産による。このシェールガスは、次世代自動車にも多大な影響を及ぼしている³⁴⁾。豊富に採れるシェールガスがガス価格を押し下げたため、シェールガスから製造した水素を燃料電池車の燃料として安価で安定的に使用できるようになった。これが次世代自動車の本命とされていた電気自動車を燃料電池車が抜き去る要因のひとつである。

シェールガス、シェールオイルは水平掘削技術、高圧掘削技術、精密地震探査技術（マイクロサイスミック技術）で、採取可能になった。水平井戸をパッカーでセクションに区切り、温水（ウォーターインジェクション）や表面活性を高める化学物質（ケミカルインジェクション）を数百気圧の高圧でシェール層に噴射し、多数の微細な割れ（フラクチャー）を作る。マイク

33) K・ケリー著、服部桂訳 [2014]「テクニウム テクノロジーはどこへ向かうのか？」みすず書房

34) 泉谷渉 [2013]「シェールガス革命」東洋経済新報社 「シェールガスから水素の原料メチルアルコールがとれるため、水素エネルギーを使う燃料電池車が一気に前倒しされる。パナマ運河の拡張工事は2014年に完成し、2015年からは運航が可能になる。」

ロサイスミック技術は、フラクチャーができるときの地震波をコンピューターが解析し3次元画像で可視化する。一方、米国民1人の原油消費量は、1970年に30バレル、1988年に24バレル、2008年に21バレルと着実に下がり続けている。今のところ、シェールガス掘削技術は米国の独壇場であり、シェールガスやシェールオイルが増産され、今まで通りに石油消費が落ちれば、米国が石油や天然ガスの輸出国に蘇り、貿易赤字を解消する日も近いと考えられる。

高コストのシェールガスやシェールオイルに脚光が浴びること自体、石油や天然ガスの枯渇を意味するものであると認識する必要がある。たとえ画期的な技術を使ってもシェールガスやシェールオイルの採取は、従来型石油や天然ガスと比べ極端な高コストである。すなわち、取りやすいものから使っていく「Low Hanging Fruitsの法則」が指摘するように、シェールガスやシェールオイルの大増産は、石油や天然ガスの終焉を如実に物語っている。皮肉な言い方をすれば、従来型の石油や天然ガスが枯渇してきたお蔭で、シェールガスやシェールオイルが採取され始めたと言える。化石燃料の枯渇は着実に進行していることは間違いない。

石油の経済的枯渇はあと40年間であり、その期間をシェールガスやシェールオイルが僅かばかり延命させたとしても、せいぜい60年間程度と考えられる。脱原発運動で四面楚歌にある原子力燃料の経済的枯渇は60年間で、いずれ地球上から姿を消すことは間違い。ウランにプルトニウムを混ぜて燃やすプルサーマル発電も脱原発運動で先が見えない。プルトニウムを原料とする高速増殖炉発電や核融合炉発電は未だ世界で本格的に実用化した例はない。水力発電は巨大ダムが自然を破壊する理由から新規着工が難しい。風力発電は近隣住民への低周波騒音問題やバードストライク問題から進んでいない。太陽光発電は1kw当たり32円という高価な買い取り価格に支えられ一時的に活発化した。しかし、天候に左右され必要な時に発電できない理由から電力会社が反発しており、今では太陽光発電は風前の灯にある。メタンハイドレート発電は、化石燃料と同じように二酸化炭素を排出する問題だけでなく、未だに採取技術が確立されていない。その他、地熱発電、潮力発電、波力発電、太陽熱発電、海洋温度差発電、スーパーソルガムなどのバイオエネルギー発電は、経済的に成り立たないのが現状である。つまり、結論は地球に残されたエネルギー源を無駄なく大切に使うことである。

ガソリン車で石油を無駄遣い（自動車のエネルギー効率は20%であり、80%は無駄遣い）していた20世紀が終わり、21世紀中には石油資源は完全に枯渇し、その終焉時には石油価格は高騰することは間違いない。今から100年後の人々は、エネルギー効率20%のガソリン車を我が物顔で走らせていた21世紀初頭の我々を嘲笑し軽蔑することになる。しかし、ガソリン車に代わる電気自動車は、充電する電気を発電する段階で大量の二酸化炭素を排出し、電気自動車用のリチウムイオン電池1kgを製造する段階で50kgの二酸化炭素を排出する。原子力発電が停止し太陽光発電や風力発電が未成熟な日本において、電気自動車はますます不利な環境になっている。そこで、脚光を浴びているのが、水素を燃料とする燃料電池車である。燃料電池は、

極めて高い発電効率と、発電時に二酸化炭素などの有害物質をまったく発生させない特徴を持っている。とりわけ、天然ガスを燃料とする燃料電池発電所は、発電効率を70%にまで向上させることに成功している。

燃料電池は水素と酸素を使った発電装置である³⁵⁾。酸素は空気中に20%存在し、水素は宇宙で最も多い元素である。さらに、水素の製造方法は多様で、化学工場の副産物としてタダ同然で生成され、これまで未利用だった低品位石炭などからも生成できる。電気は貯蔵できないが、余った深夜電力や太陽光を使い電力を水素に変換することで電気エネルギーを貯蔵することが可能になる。このような理由から、川崎重工業と三菱重工業は水素発電所を検討している。

この水素を自動車に利用できれば、無尽蔵のエネルギー源が手に入るに等しい。水素は環境に優しいだけでなく、石油のように地球上で偏在することがなく、地政学的リスクがない。今のところ天然ガスを燃料に使う燃料電池は、最も水素含有率が高いメタン(天然ガスの主成分)から水素を取り出し、空気の酸素と化学反応させて電気を得る。天然ガスから水素を取り出すときに二酸化炭素が出るが、発電所の火力発電よりも遥かに少ない。さらに、太陽光やバイオマスなどのクリーンで再生可能なエネルギーを利用して水素を製造することも可能であり、水素を燃料とする燃料電池は環境負荷からも理想的なエネルギーである。燃料電池はエネルギー効率が非常に高い³⁶⁾。一般的な火力発電所のエネルギー効率は35%であるが、燃料電池は40%が電力に40%が熱に変換でき、総合的なエネルギー効率は80%にも達する³⁷⁾。

つまり、水素と酸素の化学反応で作ridす燃料電池は、今までの発電と比べ二酸化炭素の排出量が極めて少ない。さらに、燃料電池は、大気汚染の原因となる窒素酸化物(NOx)、炭化水素(HC)、一酸化炭素(CO)、浮遊粒子状物質(PM)をまったく排出しない。加えて、電力は遠い発電所から送電線を使って送られる間に送電損失があるが、燃料電池は車内や家庭で発電するため送電損失がなく、100%利用可能である。とりわけ、燃料電池はカルノーサイクル効率(発電プラントの作動温度を高くしなければ高い効率が得られない)による制約がない

35) 御堀直嗣 [2009]「電気自動車は日本を救う」C&R研究所 「燃料電池車に使われる固体高分子型の構造は、水素原子から電子を分離するためのイオン交換膜が真ん中にあり、その両側に電極がある。電極には、薄く白金が塗ってある。この白金が、水素原子から電子を分離する触媒の働きをする。水素は、マイナス極側に供給され、白金触媒の影響で電子を分離。その電子が、電線を伝わってプラス極に流れる。これで発電したことになる。電子を分離した水素イオンは、イオン交換膜を通り抜け、プラス電極側に移動。そこに供給された酸素と、電線を移動してきた電子と化学反応し水を生成。このとき発熱するので、水は蒸気となって外に排出される。」

36) 西川尚男 [2013]「新エネルギーの技術」東京電機大学出版局 「燃料電池車で使用される水素は、水素ステーションで化石燃料から製造された水素であり、その水素製造効率は55～65%である。燃料電池のCO₂排出量は、ガソリン車に比べ55%削減できる。」

37) 「エコノミスト」2014年8月26日

ため、燃料電池は低温で小規模の出力でもエネルギー効率が高い特徴を持っている。さらに、日本だけの好都合な特殊事情であるが、パナソニック、東芝、京セラ、東京ガス、大阪ガス、東邦ガス、西部ガス、アイシン精機など、多くの企業が家庭用燃料電池を製造しており、燃料電池の認知度は非常に高く、その安全性も一般に広く認知されている。

個体酸化物形燃料電池SOFCは運転温度が1000度Cで、電解質が安定化ジルコニアである。溶融炭酸塩形燃料電池MCFCは運転温度が650度Cで、電解質が溶融炭酸塩である。個体酸化物形燃料電池と溶融炭酸塩形燃料電池は、分散電源用途と産業用途として用いられ、発電効率が45～60%と優れている。リン酸形燃料電池PAFCは運転温度が200度Cで、電解質がリン酸である。リン酸形燃料電池は、民生用途と産業用途として用いられ、発電効率が35～60%である。個体高分子形燃料電池PEFCは運転温度が80度Cで、電解質がイオン交換膜である。個体高分子形燃料電池は、小型産業用途、移動体用途、携帯用途に用いられ、発電効率は30～40%である。他の発電方法に比べ、いずれの燃料電池も発電効率が優れており、発電効率の高さが燃料電池の強みである。

寺田寅彦が「統合という事実がなければ多くの科学はおそらく一步も進むことは困難であろう。何の関係もないような事実の間に密接な連絡を見出し、個々別々の事実を一つの糸にまとめるような仕事ははなはだ多い。³⁸⁾」と発言しているように、関係がないと思われる分野の発明を応用することの重要性を説いている。燃料電池技術は、日本ではさまざまな業界で多角的な技術に進化しており³⁹⁾、これを次世代自動車に活用することは、海外勢に差をつける絶好のチャンスである。

たとえば、水素製造企業は、岩谷産業、千代田化工建設、三菱化工機、日立造船、旭化成があり、水素貯蔵企業は、川崎重工業、千代田化工建設、中国工業、UACJがある。また、水素分離膜企業は、イリタケカンパニーリミテッド、日本精線、日本ガイシ、宇部興産が有名である。さらに、燃料電池製造企業は、フタバ産業、ニッポン高度紙工業、クラレ、トクヤマ、日清紡ホールディングス、東洋炭素、日本軽金属ホールディングス、ホソカワミクロン、田中化学研究所、第一希元素化学工業、日立マクセル、東レ、日本触媒、黒崎播磨、ニチアス、ハマ

38) 赤祖父俊一 [2013]「知的創造の技術」日本経済新聞社

39) 泉谷渉 [2013]「シェールガス革命」東洋経済新報社 「燃料電池関連企業：トヨタ、ホンダ、アイシン精機（家庭用燃料電池）、出光興産（LPガスや灯油型燃料電池）、NEC（燃料電池用ナノ材料活用）、NTTドコモ（携帯用燃料電池）、カシオ（携帯用燃料電池）、KDDI（携帯用燃料電池）、東芝（家庭用燃料電池）、パナソニック（家庭用燃料電池）、ヤマハ発動機（バイク用燃料電池）、日清紡（燃料電池用カーボンセパレーター）、昭和電工（燃料電池用カーボン樹脂セパレーター）、新日鉄住金（燃料電池用ステンレスセパレーター）、大同特殊鋼（燃料電池用金属セパレーター）、日立電線（燃料電池用金属セパレーター）、東海カーボン（燃料電池用セパレーター用黒煙剤）、東洋紡（燃料電池用高性能炭化水素系電解質）、トクヤマ（燃料電池用イオン交換膜）」

イ，チノー，島津製作所，東陽テクニカがある。このように日本は燃料電池分野で世界の先頭を走る技術力を持っている。また，水素ステーション（水素スタンド）を営業すると表明している企業は，JXホールディング，岩谷産業，神戸製鋼所，大陽日酸，住友精化，キッツ，シナネン，日本製鋼所，オーバル，アズビル，日東工器，愛知時計電機，新日鉄住金，東京ガス，大阪ガス，東邦ガス，豊田通商，加地テック，愛知製鋼，横浜ゴム，日本合成化学工業，八千代工業，伊藤忠エネクス，出光興産，新コスモ電機，共和電業などがある。

1995年から2013年までの自動車会社以外の燃料電池特許は，パナソニックが3172件，東芝が1974件，京セラが974件，富士電機が923件，アイシン精機（家庭用燃料電池）が887件，三菱重工が868件，日立製作所が604件，東京ガスが530件，大阪ガスが506件，ソニーが494件，JXホールディングが465件，出光興産が274件，東レが181件，旭化成が174件，日立マクセルが169件である。以上のように，高い技術力を持つ燃料電池関連企業が多く，かつ，強固に結び付いた産業群を形成していることが，トヨタやホンダが電気自動車よりも燃料電池車の方を選択する理由である。

4-2 燃料電池車の開発史

燃料電池の歴史は古く，1932年の英国のフランシス・ベーコンによる燃料電池の発明が燃料電池のスタートである⁴⁰⁾。しかし，実用化されるまでには，電解質の研究開発，水素吸蔵合金の研究開発，水素を取り出す改質の研究開発，水素を貯蔵するための水素タンクの研究開発，電子を分離するための白金などの触媒の研究開発などが必要であった。なかでも，水素吸蔵合金に水素を貯蔵する研究開発と，メタノール改質（自動車に積み込んだメタノールから水素を取り出す方法）で燃料電池車を実現しようとする試みが失敗したため，燃料電池車は長い道草をすることとなった。

トヨタは1996年に水素吸蔵合金を使用した燃料電池車を試作し，1997年にメタノール改質を利用した燃料電池車を試作し，2001年に高圧水素タンクを搭載した燃料電池車を完成させている。同様に，ホンダは1999年に水素吸蔵合金を使用した燃料電池車とメタノール改質を利用した燃料電池車を試作し，2000年に高圧水素タンクを搭載した燃料電池車を完成させている。燃料電池用の水素吸蔵合金は，水素を貯蔵する手段として長期に渡り研究され，多くの特許⁴¹⁾

40) 永田裕二〔2014〕「燃料電池という選択」ダイヤモンド社 「1932年，英国のフランシス・ベーコンが燃料電池を開発し，1952年にベーコン電池として特許を取得。1958年，ベーコン電池特許は，米国のユナイテッド・エアクラブ社が獲得し，実用化に成功した。燃料電池は有人宇宙飛行のジェミニ5号に採用された実績もある。」

41) 水素吸蔵合金の代表的な特許：トヨタ自動車WO99/34025「水素吸蔵合金，水素吸蔵合金の製造方法，水素吸蔵合金電極，水素吸蔵合金電極の製造方法，及び電池」，トヨタ自動車WO98/13158「水素吸蔵合金粉末」

が出願されているが、実用化されることはなかった。その最大の理由は、水素吸蔵量に比べ水素吸蔵合金自体の重量が大き過ぎたことであった。そこで、自動車に改質装置を搭載し、車内でメタノールから水素を取り出す方法を研究したが、起動時間が長くなるため、これを断念している。メタノール改質するためには250℃程度の加熱が必須となるためである。加えて、メタノールスタンドの整備も必要となるため、メタノール改質燃料電池車を決断できなかったと考えられる。

図6は、トヨタとトヨタ系列企業、ホンダ、ニッサンの燃料電池車に関する特許数の1995年から2013年の19年間の推移を示している。トヨタとトヨタ系列企業の燃料電池車の研究開発は、ホンダとニッサンを寄せ付けない技術的優位を確保している。ホンダとニッサンの研究開発が2000年から本格化したことに比べ、トヨタの燃料電池車に関する研究開発は他社よりも非常に早い。また、トヨタの特許数は2009年には年間1400件を超えており、トヨタの燃料電池車への

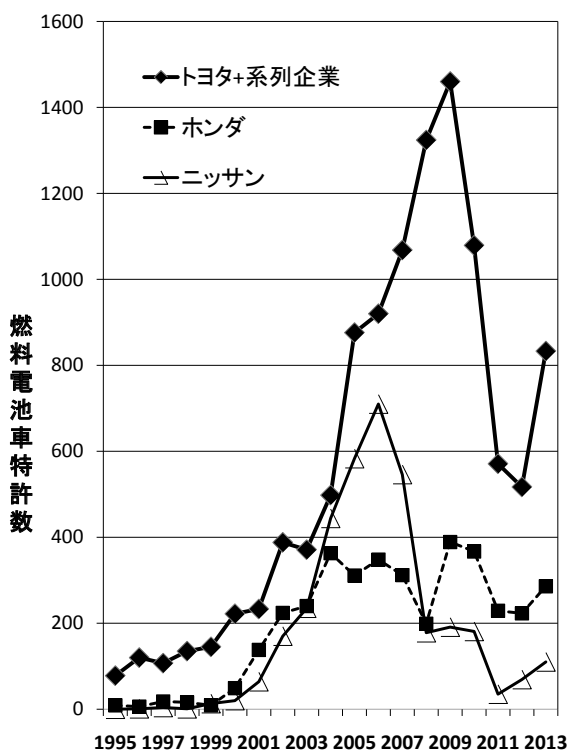


図6 燃料電池車の特許出願数の推移

✓末および水素吸蔵合金粉末の製造方法」, 本田技研WO01-000891「水素吸蔵合金粉末およびその製造方法」, 三井金属鉱業WO2008-123616「水素吸蔵合金」, 三井金属鉱業WO2007-034892「低Co水素吸蔵合金」, 東芝WO01-048841「水素吸蔵合金、二次電池、ハイブリッドカー及び電気自動車」

執念を感じさせる。一方、ニッサンは本格的な研究開始が2003年で、トヨタより遅れただけでなく、2008年以降、燃料電池車の研究開発を急減させている。燃料電池車に関する研究開発において、トヨタとニッサンの違いは明らかである。

図7は、デンソー、アイシン、豊田中央研究所、豊田織機、豊田合成、ダイハツ、日本自動車部品などのトヨタの系列企業単独の燃料電池車の特許数、それらの系列企業とトヨタとの共同出願特許数、トヨタ単独の燃料電池車に関する特許数である。図5に示したように、電気自動車に関するトヨタの研究開発は、系列企業も含めた全トヨタの約63%（10524件中6623件）である。しかし、図7が示すように、燃料電池車ではトヨタの研究開発が76%（10945件中8331件）に達している。上述したように、トヨタが最重要と考える仕事は、たとえ親しい系列企業にも渡さず、トヨタ自身が行う習性がある。このことから、トヨタは少なくとも20年前から電気自動車ではなく燃料電池車の研究開発を優先してきたと考えられる。

1975年頃に研究開発がスタートした水素吸蔵合金は、ランタンニッケル合金 LaNi_5 、マンガン亜鉛合金 MnZn_2 、チタンモリブデンクロム合金 TiMoCr など、常温常圧のガスに対し貯蔵体

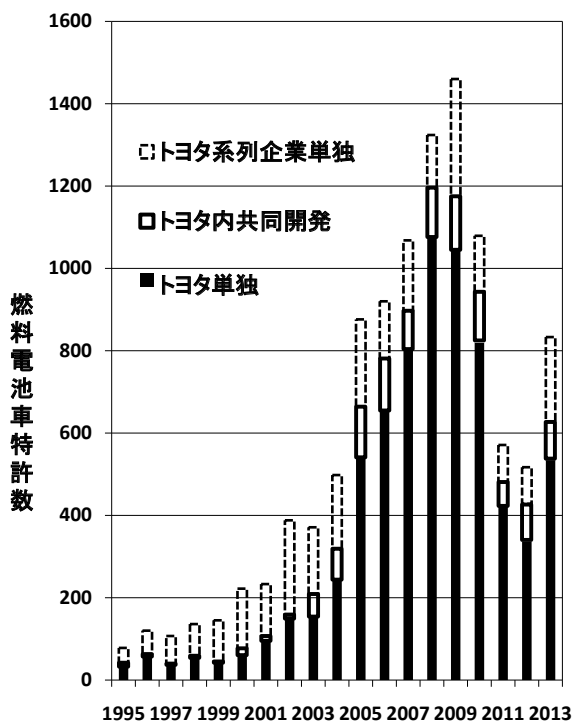


図7 燃料電池車の研究開発におけるトヨタ系列企業の寄与(デンソー、アイシン、豊田中研、豊田織機、豊田合成、ダイハツ、日本自動車部品総合研究所等)

積が約 1/1000になる成果を見出した。しかし、これらの水素吸蔵合金は、燃料電池車用の水素吸蔵用途には実用化されず、約20年間の研究開発が結実することはなかった。しかし、その水素吸蔵合金の研究成果は、ニッケル水素電池の負極材料に使われる水素吸蔵合金として蘇ることになる。現在でも水素吸蔵合金の技術開発は、新日本電工、日本製鋼所、那須電機鉄工などの企業で継続されている。

2014年5月に安倍首相は成長戦略第二弾で燃料電池車の普及に言及し、日本が燃料電池車に全力を投入する姿勢を示した。トヨタは2014年12月15日に燃料電池車「MIRAIミライ」を世界に先駆け発売した。燃料電池車の生産能力は年間700台であるが、発売日に年間生産台数を超える1000台の予約が入っている。そこで、トヨタは燃料電池車の増産体制を検討中である。

燃料電池車を期待するのは日本だけではなく、欧米でも燃料電池車に熱い視線を送っている⁴²⁾。そのような中、トヨタと独BMWが燃料電池車の共同開発を締結し、ホンダは米GMと提携し、ニッサンは独ダイムラーや米フォードと燃料電池車の日独米連盟を結成した⁴³⁾。燃料電池車の発電用部品に強いトヨタ、燃料電池車の水素ボンベ材料に強い独BMWというお互いの強みを生かした相互補完の技術提携である。国際提携は、研究開発の加速や効率化、部品の共有化に有効であり、社会インフラ整備にも弾みをつける意味もある。

反面、燃料電池の開発で先陣を切ったカナダのパラード社は、共同研究相手と燃料電池のリバースエンジニアリングを禁止する契約書を交わすなど、契約書で燃料電池技術を秘匿し、同時に、特許権で他社の模倣を阻止している。しかし、トヨタとホンダとニッサンは、燃料電池技術を秘密にするのではなく、技術を公開し、それを標準化することを優先させた。その結果、トヨタとホンダとニッサンの3社が提案した燃料電池車の国際標準が採択され、国内仕様のままで海外市場に輸出できることになった。日本の自動車企業は欧米企業との技術提携を行った結果、燃料電池車のデファクト・スタンダード取得競争のような無益な争いを回避できた。このためトヨタは、電気自動車を後回しにして燃料電池車を優先する決断をしたものと考えられる。

4—3 燃料電池車のイノベーション

燃料電池車と電気自動車は次世代自動車として共存していくことになる。トヨタやホンダは、

42) 佐藤昇 [2014]「人材を育てるホンダ 競わせるサムスン」日経BP社 「ブッシュ政権が発足すると、米国では水素社会システムを看板に掲げ、国家プロジェクトとして燃料電池車の開発に巨額の資金を投じた。水素燃料電池車に関してはその価値をEVの10倍、つまり燃料電池車1台がEV10台分の重みづけをした。」

43) 日本経済新聞2014年8月5日 「トヨタ自動車は2014年度に燃料電池車を市販。水素タンクは炭素繊維材料を独自の方法で巻き上げて700気圧に耐えるタンクを開発した。トヨタはBMWと組み、基幹部品を共同開発。日産はダイムラーやフォードと提携し、スタック、燃料タンクを共同開発する。」

ハイブリッド車やプラグイン・ハイブリッド車で電池開発を行っており、ニッサンは、電気自動車で電池開発を行ってきた。今後、今まで以上に自動車会社の研究開発は、次世代の電池開発に軸足を置くことになる。なかでも、全個体電池⁴⁴⁾とリチウム空気電池⁴⁵⁾とナトリウムイオン電池⁴⁶⁾の研究開発は激しい競争が起きており、これらの技術を獲得した企業が次世代自動車の覇者に近づくことになる。電解液を固体電解質に置き換えた全固体電池，正極に空気中の酸素を使うリチウム空気電池，ナトリウムやニッケルを含む正極とニオブなどの負極によるナトリウムイオン電池は、自動車の将来を塗り替える可能性がある。燃料電池車と電気自動車は、競争相手だけでなく、脱ガソリン車戦略では味方であり、両方ともモーターで走る電気自動車であり、共通する技術も多い。電気自動車の技術的進歩は燃料電池車の進歩を促すことも少なくない。

自動車会社の研究開発は、コンピューター制御のためのパワー半導体開発を加速させている。これは燃料電池車にも電気自動車にも強い味方となる。現在使用されているシリコンをシリコンカーバイドに変更できると、インバーターやコンバーターにおける電力損失を大幅に低減できる。そのため発熱量が減り、インバーターを小さく軽くできる。シリコンカーバイドのパワー半導体の研究開発は、日本で最も激しい競争が起きている分野である。インバーターやコンバーターは広く使われているため、この競争は自動車メーカーだけでなく、家電や産業機械や電機メーカーも巻き込んだ総力戦になっている。

シリコンカーバイドのパワー半導体の関連特許⁴⁷⁾ (1995年～2013年) は2987件あり、トヨタ

-
- 44) <全固体電池の関連特許> 日立造船：特許公開2012-89388「全固体電池の製造方法」、トヨタ自動車：特許公開2014-216131「全固体電池およびその製造方法」、トヨタ自動車：特許公開2014-203740「全固体電池」、トヨタ自動車：特許公開2014-146501「全固体電池」、トヨタ自動車：特許公開2014-146458「全固体電池および電池システム」。
- 45) <リチウム空気電池の関連特許> トヨタ自動車：WO2010/073332「リチウム空気電池」、本田技研：特許公開2014-209466「リチウム空気電池およびリチウム二次電池」、トヨタ自動車：特許公開2014-197454「リチウム空気電池用の電解液」、トヨタ自動車：特許公開2014-86256「リチウム空気電池正極用炭素材料及びリチウム空気電池」、スズキ：特許公開2014-123459「リチウム空気電池、およびリチウム空気電池の負極複合体」。
- 46) <住友ベークライトのナトリウムイオン電池の関連特許> 特許公開2014-154546「負極材料、負極活物質、負極およびアルカリ金属イオン電池」、特許公開2014-154290「負極材料、負極活物質、負極およびアルカリ金属イオン電池」、特許公開2014-132592「負極材料、負極活物質、負極およびアルカリ金属イオン電池」、特許公開2014-132556「負極材料、負極活物質、負極およびアルカリ金属イオン電池」、特許公開2014-132555「負極材料、負極活物質、負極およびアルカリ金属イオン電池」、特許公開2014-132551「負極材料、負極活物質、負極およびアルカリ金属イオン電池」。
- 47) <パワー半導体の関連特許> トヨタ自動車：特許公開2012-228114「パワーモジュール及び該パワーモジュールを搭載したハイブリッド車又は電気自動車」、特許公開2012-234908「炭化珪素半導体装置」、特許公開2013-214658「炭化珪素半導体装置およびその製造方法」、本田技研：特許公開2012-138459「パワー半導体モジュール、及びその製造方法」、日産自動車：特許公開2013-33812「パワー半導体モジュール」。

131件、トヨタ系列企業を含めた全体で430件、ホンダ18件、ニッサン103件が出願されている。エアコン・メーカーや電力会社はシリコンカーバイドのパワー半導体による効率向上を狙い、開発を急いでいる。200℃程度が限界のシリコンに比べ、シリコンカーバイドは耐熱性が高く300℃程度の高温で作動し、冷却装置が小型軽量になる。また、シリコンカーバイドはスイッチング周波数を高くできるため、スイッチング電源回路の周辺部品を小型化できる。さらに、自動車以外の分野でも使用されるため、歩留向上や量産効果によるシリコンカーバイドの価格低下が、シリコンカーバイドのパワー半導体へのシフトを加速している。

トヨタは、テスラ・モーターズのような電気自動車ベンチャーが数多く参入し、低価格競争になることを極端に恐れている。藤本雄一郎によれば、インドのタタ社は、50万円の超低価格の電気自動車を生産できるとしている⁴⁸⁾。インドの自動車メーカーは新車開発を始める前に、新車の仕様をオープンにし、世界の部品メーカーにコストで競争させ、最も安く作れる部品メーカーに決定する⁴⁹⁾。そこで、部品メーカーは新たに開発してコストを高くするより、既にある汎用的な部品を流用し、量産効果で低コスト要求に応じるのが常となる。電気自動車はガソリン車のような擦り合わせ技術が不要であり、部品を購入して誰でも組み立てられる。ガソリン車よりも部品点数が少なく単純構造の電気自動車（ガソリン車の部品点数は3万点、電気自動車の部品点数は1万点）は、コモディティ化の格好のターゲットになる可能性が高い。トヨタはこのような自動車のコモディティ化を最も嫌っているため、電気自動車の投入を可能な限り遅らせたいと考えている。

一方、燃料電池車はトヨタやホンダが得意とする擦り合わせ技術が必要であり、テスラ・モーターズのような新規参入は不可能と考えられる。燃料電池のスタックに電解質膜とセパレーターを組み込み、貴金属である白金を触媒として発電する研究開発は、資金力のない中小ベンチャーにはかなり難しい。これが、トヨタやホンダが電気自動車ではなく、コモディティ化しにくい燃料電池車を優先させたいもう一つの理由である。

また、日本企業が得意とするCFRP燃料タンクの製造は、高い参入障壁になるため、燃料電池車に傾倒することは容易に理解できる。また、石油会社は、家庭でも充電できる電気自動車に危機感を抱いていたが、燃料電池車になればガソリンに加えて水素を販売できるため、燃料電池車の強力な応援団になっている。さらに、家庭用燃料電池の先駆者で豊富な実績のある東芝、パナソニックは燃料電池車の強い味方である。このような状況を考慮すると、今は電気自

48) 藤本雄一郎 [2013]「破壊的イノベーション」中央経済社

49) [2014]「次世代自動車2014」日経ビジネス 「インドのバジャン・オートのRE60は、1台12～15万ルピー（約21～26万円）の最安自動車。4人乗り、エンジンは200ccで、20馬力、最高時速は70km、ガソリン1リッター当たり走行距離は35km。タタ・モーターのナノの価格15～20万ルピー（約26～35万円）よりも安い。東南アジアや中国で最も売れるクルマは50万円前後。超低価格部品のコモディティ化が進行中。」

動車ではなく燃料電池車に注力することに議論の余地はない。

トヨタは燃料電池車の販売を開始すると同時に、普通サイズの電気自動車は造らないと明言している。電気自動車は単純構造で部品点数も少なく誰でも簡単に製造できる。反面、燃料電池車は日系企業が国際標準を握れるほど強みを持っており、トヨタおよびトヨタ系列企業が独自の特許技術を活用できるため、トヨタは次世代自動車の本命を燃料電池車に据えたいと考えている。

トヨタの東富士研究所には、燃料電池開発部員が300人、量産化に向けて車の作り込みに近い開発をしている燃料電池技術部に300人配属され、開発要員だけで1000人を超えている。また燃料電池スタックの内製化だけでなく、水素タンクまで内製化している⁵⁰⁾。燃料電池への全社を挙げた人材投入はトヨタの真剣に取り組む姿勢が感じられる。また、豊田章男社長は、環境に優しい水素オリンピックを目指す2020年の東京オリンピックの組織委員会副会長に就任した。オリンピックは、水素ステーションなどのインフラ整備を加速する絶好の機会であり、トヨタの燃料電池車に対する強い情熱が国を動かすことは間違いない。燃料電池車が、環境対策に全力を挙げるトヨタのブランドのイメージアップができれば、販売当初の赤字は豊富な資金力のトヨタにとってまったく問題ない。世界初のハイブリッド車プリウスの発売、それに続く、世界初の燃料電池車ミライの発売が、環境に優しい先端企業トヨタをどれだけアピールできるかは、社会が決めることになる。

4—4 燃料電池車の課題とその対策

燃料電池車はまだ欠点が多く、今後、解決しなければならない課題も山積している。

1) 水素充填のための水素ステーションの建設費が高い問題

水素ステーションの建設費が高い理由は、水素脆性の少ない特殊な鋼材使用や立地に関する規制が多いためであり、日本の建設費は4億～5億円で欧米の1.5億円より遥かに高い。水素ステーションの規制緩和は、日本政府の本気度を測る物差しとなる。政府は水素ステーションの設置コストを半減するために、その建設基準や保安規制の緩和を検討し始めている。水素充填機の設置場所は、安全を考慮して公道から8m以上離れることを原則としているが、4m以上にする緩和案を検討中である。これが実現すれば、多くのコンビニが駐車場で水素ステーションを営業できることになる。大陽日酸は、ハイドロシャトルと呼ばれる移動式の水素ステーションで水素を販売する。これは、土地購入費がかからないため低コストであり、水素ステーションの建設費問題を解決する正解のひとつである。また、太陽光で発電した電力を使い、水から水素を生成して、水素充填する簡易ステーションの設置基準の見直しを政府が検討し始めている

50) 週刊ダイヤモンド2014年10月25日

る。化石燃料を一切使わず、太陽光だけで走る燃料電池車が現実のものとなる日は目前に迫っている。

2) 白金触媒の高コストと偏在問題

燃料電池車には白金触媒が約100g必要であり、燃料電池車の価格を高くする最大の原因になっている。その白金の埋蔵量の9割は南アフリカに偏在している。石油や天然ガスの化石燃料をOPECが支配し、希土類金属（レアメタル）を中国が支配しているように、もし白金が禁輸されれば、白金を使う燃料電池車は風前の灯になる。

そこで、白金を削減⁵¹⁾、または、白金を不要とする研究開発が活発であり、多くの特許が出願されている。特許公開2014-91061熊本大学「鉄フタロシアニン／グラフェンナノ複合体、鉄フタロシアニン／グラフェンナノ複合体担持電極及びこれらの製造方法」の特許は白金触媒と同等の性能を有した白金フリーの安価な酸素還元触媒の発明である。特許公開2011-233283三菱重工業「燃料電池用電極触媒」の特許はストロンチウムとニッケルとタングステンの複合酸化物やバリウムと銅とタングステンの複合酸化物で白金触媒を不要にする発明である。特許公開2009-231196新日本石油「燃料電池用電極触媒、並びにそれを用いた膜電極接合体及び燃料電池」の特許も白金触媒を不要にする発明である。もし白金フリーの触媒が可能になれば、燃料電池車の価格は大幅に下がると考えられる。

3) 発電水の凍結問題

燃料電池で発電すると水が発生する。この水が零下の気温で氷になり、燃料電池の発電に不都合が生じることが懸念される。現在の解決策は、燃料電池の効率をあえて悪くし、発生させる電力を犠牲にすることで水を高温にし、凍結を防止している。燃料電池の効率向上と凍結防止の両立が残された問題である。

4) インバーター性能問題

上述したように、インバーター性能の向上のために、シリコンカーバイドのパワー半導体の開発が進行している。燃料電池で作られる電気は直流であり、モーターで使用するのは交流である。直流から交流に変換するインバーターが必要になる。燃料電池の出力が低電圧であるためインバーターの効率が悪くなる。インバーターを使用せず、直流モーターを使用することも不可能ではない。直流モーターは、出力と始動トルクが大きく、小型軽量で安価である。しかし、直流モーターは、自動車の減速時にモーターを発電機として使う回生（充電）を利用することが難しく、さらに、整流子の摩耗を防ぐ目的でカーボンブラシを犠牲にするため定期的なブラシ交換が必要である。回生とブラシ交換の問題が解決すれば直流モーターが採用され、イ

51) 日本経済新聞2014年10月21日 「帝人が燃料電池車の触媒に、高価な白金を使わず、鉄と窒素を使う安価な触媒を開発。現在の触媒は炭素粒子に白金を付けているが、白金の産地は南アフリカとロシアに偏る。帝人は触媒の価格を10分の1以下にする目標。」

ンバーターを使わない燃料電池車が実現する可能性がある。

5) 水素爆発問題

水素タンクは、内層がプラスチック素材、中間層が炭素繊維強化プラスチック、外層がガラス繊維強化プラスチックの3層構造（肉厚25mm）で700気圧の耐圧を持っている。水素センサーや加速度センサーで水素の漏れや車両の衝突を検知すると、水素タンクのバルブが自動的に閉じられる。また、水素タンクや配管を車外に配置しているため、水素が外部に拡散する構造になっている。水素は空気よりも軽いので、たとえ漏れても空気に拡散し大事故になる可能性は非常に低い。しかし、水素による火災は伝播速度が速く爆発エネルギーも大きい。水素は静電気で簡単に引火し爆発することもあるため取り扱いには注意する必要がある。

世界初のハイブリッド車プリウスのブレーキ問題やレクサスの急加速問題など、2009年の米国での「トヨタたたき」は記憶に新しい。それはトヨタが米国の誇りであり米国民の期待の星であるGMを米国シェアで抜き去ろうとした瞬間の出来事だった。米国民の自尊心を傷つけたことがトヨタを炎上させた⁵²⁾。たとえ、トヨタの過失が一切ない水素爆発であっても、米国民はトヨタを絶対許さない。その理由は、GMよりも早く世界初の燃料電池車を販売したトヨタを我慢できない米国の国民性のためである。トヨタは、燃料電池車の販売を、万全の品質管理と丁寧なアフターサービス体制を整えて、米国での販売を開始することになる。

家庭用燃料電池が広く知られた日本は、燃料電池車の初適用として絶好の場所であり、先ず日本で実績を積むことが現実的である。原発が停止した現在の日本では、電気自動車は化石燃料による発電時の二酸化炭素の排出を考えると、地球にやさしい自動車は電気自動車よりも燃料電池車の方が優位に立っている。電気自動車が普及すれば、トヨタは二次電池やモーターやインバーターを購入する単なる組み立て屋になり、低価格競争に陥ることは必至である。これは日本の電機メーカーが歩んだ茨の道であり、トヨタの得意とする擦り合わせ型の生産方式の消滅を意味する。トヨタの独自開発による多様な内製部品を搭載した燃料電池車は、他社の追随を許すとは考えられない。燃料電池車「ミライ」には、トヨタが部品組み立て屋には絶対なりたくない決意と自信が溢れている。

52) 齊藤淳 [2014] 「アメリカ型ポピュリズムの恐怖」 光文社新書 「リコールや急加速問題の発端となったレクサスの死亡事故は、NUMMI閉鎖の発表の翌日であった。事故後、トヨタたたきが強まり始めた頃、業界アナリストは「NUMMIでの生産打ち切りを決めたことでトヨタは米国の怒りを買った」と警鐘を鳴らした。NUMMIの閉鎖問題がトヨタによる従業員への退職支援金の特別支援合意などで決着した後、さらに、トヨタとテスラがEV共同開発を提携したことで、NUMMIの1000人をテスラが再雇用し、UAW関係者のトヨタへの不信感や嫌悪感を払拭できた。」

5 章 自動運転車のイノベーション

5—1 自動運転車の胎動

自動運転車の胎動はすでに日本で始まっている。富士重工業のアイサイトのように、衝突防止技術や自動ブレーキが自動運転車レースの出発点である。自動車各社が争って自動ブレーキを搭載し、衝突安全装置を標準装備する自動車が増えている。衝突防止技術や自動ブレーキの普及は、自動車購入者が約10万円高く支払ってでも自動ブレーキを希望する場合が増えたためである。このことは、自動車会社に自動運転車の研究開発を急がせる要因になっている。

自動運転車はすでに各方面で実用化されている⁵³⁾。たとえば、コマツが製造するブルドーザーやトラクターは自動運転車が多い。人里離れた山奥の鉱山で働くのは人間にとって過酷であり、熟練したドライバーが集まりにくい。そこで、建設土木分野では自動運転車が人手不足を解消する有効な手段となっている。コマツは自動運転車を販売するだけでなく、稼働状況や無人運転作業も含めて総合的な請負サービスを行っている。また、無人航空機(UAV)は、レーダーで障害物を識別しGPSで位置を確認して無人で飛行するロボットである。無人航空機は人が行くことができない場所に迅速に到達できる。農家は無人航空機を活用し農薬散布と農産物の生育状況調査に活用している。セコムは夜間警備に無人航空機を利用し、警備員の安全や機動的な警備に役立っている。アマゾンでは無人航空機を使い最大32kgの小包を宅配し、物流センターから10kmの範囲ならば30分以内で顧客に届けるサービスを始めている。コマツの無人ブルドーザーと、セコムやアマゾンの無人航空機は、自動運転車が本格化する前段階の胎動と考えられる。

社会を変革するような巨大なイノベーションの前には、このような胎動が必ず存在する。産業革命の立役者であった蒸気機関は、蒸気機関車が世に出る前に、炭鉱の水をくみ上げるために使われた胎動期間があった。現在のようにパソコン同士が情報をやり取りする前に、電話線を介したパソコン通信の胎動期間があった。携帯電話が普及する前に、自動車電話で通話した胎動期間があった。これらの胎動期間に存在したものは、次に続くイノベーションが本当に社

53) 川北蒼 [2014]「スティーブ・ジョブズがデザインしていた未来」総合法令出版 「アマゾンが、2011年物流倉庫の自動運搬ロボット「キバシステム」を買収し、倉庫の自動化に自動運搬ロボットを導入した。アマゾンの倉庫で稼働する自動運搬ロボットは、互いにコミュニケーションをとり、ロボットの位置を制御し合ってぶつからないで、最適経路を自動計算し、最短時間で商品を移動させる。1400台のロボットを導入で、注文処理費や人件費を圧縮した。多数の運搬ロボットが商品棚を下から持ち上げてお互いにコミュニケーションをとり、位置を制御し合ってぶつからないで、最適経路を自動計算し、最短時間で移動させる。この運搬ロボットは、トイザラス、GAP、オフィスデポ、ウォルグリーンなどで大成功している。」

会に受け入れてもらえるかを定めるプロトタイプ(β版)であり、この胎動期間はイノベーションの社会的価値を育む熟成期間である。後で歴史を振り返ると、今が自動運転車の胎動期間であったことが明らかになる。

自動運転車は、目的地を指示すると自動車が勝手に道路状況や安全を確認して、人間や物を指示した目的地まで自動的に運んでくれるドライバーフリーの乗り物である。自動運転車は、オートパイロット（自動操縦）自動車、ハンズフリー自動車、オートマチック自動車、ロボットカー、スマートカー、無人自動車など、呼び名さえも定まっていない。自動運転車は、通った道を映像情報に記憶し、次に通る時、その情報と照合しながら位置を確認して運転する。道路の風景は天候や季節や時間で大きく変わる。落ち葉や降雪や風雨などは道路の景観を変化させるので、コンピューターが以前通った道と認識することは容易ではないが、センサーやカメラを駆使したビッグデータを瞬時に演算できるコンピューターがそれを可能にした⁵⁴⁾。

現在の自動車には200を超えるセンサーが装備され、我々の運転をサポートしている。自動運転車が実現すれば、さらに多くのセンサーが標準装備される。そのため、自動運転車が生み出すデータは毎秒1ギガバイトを超え、そのビッグデータを演算することはコンピューターでなければできなくなる。人間が情報を入手し脳に送り判断し、その命令を手や足に送り反応するのに少なくとも約200ミリ秒かかる。一方、センサーが情報を検知しコンピューターに送り演算しブレーキやタイヤが反応する時間は人間に比べ格段に短い。さらに、人間は居眠り運転やよそ見運転などのミスが多い。自動運転車は人間が運転するよりも非常に安全で正確であることが常識になる時代は、それほど遠くない。

最新の道路状況を知っているのは前方を走る自動車である。前方の数台前の自動車が急ブレーキを踏んだことを人間には見えなくとも、後続の自動運転車が即座に反応し衝突を回避する。前方の自動車が持つ映像情報を常に送信してもらえば自動運転の精度が向上し、人間が運転するよりも先に人や障害物を発見でき、交通事故の減少や渋滞の緩和に役立つ。このように自動運転車は、障害物や道路状況を知らせるセンサーと、その情報処理を行う人工知能から構成されている。自動運転車は、コンピューターとセンサーと通信技術を活用した走るロボットである。

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）が、時速80kmで車間距離4mに保ちながら4台のトラックで縦列走行する実験を行った。その結果、空気抵抗が減少するため燃費が

54) 小川和也 [2014] 「デジタルは人間を奪うのか」講談社現代新書 「自動運転車は、レーザー・レーザーで周囲の物と自動車の距離を数cmの精度で測り、3次元地図データの特徴点と照合して自車の位置を数～十数cmの精度で計算する。単眼カメラは人や自転車、標識などを見分け、ミリ波レーダーは長距離、超音波センサーは近距離の障害物検知に使う。」

15%向上することを確認している⁵⁵⁾。自動運転車は燃費向上も期待でき、エネルギー消費量を最小限にできる。社会に自動運転車が広く普及すれば、交通渋滞が解消されるだけでなく、時刻表通りに運行する新幹線のように到着時間の精度が秒単位にまで向上し、人の移動や物の運搬が正確に予測できるようになる。

日本の交通事故死は2013年4373人であり、全世界の交通事故死は年間124万人である。自動運転車になれば、自動車事故の法的責任がドライバーから自動車メーカーに移ることになる。当初、保険会社と自動車事故を専門とする弁護士は、法的責任が賠償金などの支払い能力の高い自動車メーカーになることに大賛成する。しかし、その後、自動運転車は交通事故を激減させることが証明される^{56, 57)}。その結果、交通事故の減少で自動車保険や運転免許制度や道路交通法が大きく変化する。自動車保険の加入者が激減し、損害保険の半分を占める自動車保険の収入がなくなるため、保険会社の屋台骨が緩み、保険会社の雇用は大幅に削減されることになる。無人タクシーや無人トラックが登場し、タクシードライバーやトラックドライバーは職を失う。自動運転車は、バス事業や宅配サービスや移動販売車などの雇用や仕事を奪う痛みを伴うイノベーションを興す。

それと同時に、自動運転車は、タクシー代やトラック運賃を激減させ、経済損失が大きい交通渋滞を解消する恩恵を我々にもたらしてくれる。スマホや携帯電話から時間と場所を指定すると、自動運転車が我々を移動させてくれる社会が来る。換言すると、自動運転車はルールも時刻表もない個人専用の電車のような存在になる。電車に乗るのに運転免許証が要らないように、運転免許試験場で多額の金と時間を費やす必要がなくなる。しかし、諸外国に比べ既得権への固執に熱心な日本では、自動運転車の道路交通法改正は世界で最も遅れる可能性が高い。タクシー業界では、手を挙げてタクシーをつかまえるのではなく、スマホでタクシーを呼び出

55) [2014]「次世代自動車2014」日経ビジネス 「NEDOが、時速80kmの高速で、車間距離4mに保ちながら4台のトラックで縦列走行する実験に成功。1秒間に50回、クルマの速度と加速度を車間で無線通信し、縦列全体がほぼ同時に加速・減速することを可能にした。空気抵抗が減るため15%以上の燃費が向上し、車間距離が縮まるので、渋滞抑制などの効果もある。自動運転技術は、エネルギー使用量の削減や、配送時間の短縮などに有効。」

56) 小川和也 [2014]「デジタルは人間を奪うのか」講談社現代新書 「IEEEは、2040年には車の75%が自動運転車と予測。自動運転になれば交通事故を劇的に減らせ、効率的に流れるようになり、燃費効率が上がる。」

57) ジョージ・ビーム著、林信行訳 [2014]「Google Boys」三笠書房 「走行距離は32万キロメートルを超えるが、いまだ無事故。目的地を伝え、ハンドルにいったい手を触れずに勝手に走り、ちゃんと信号で止まり、駐車もしてくれるロボットカー（自動運転車）。グーグルは、自動運転車の技術を応用し、広告費で運営される無料のロボットタクシーを開発する噂。米国では車の事故が、16歳の若者の死亡原因のトップ。ベイジが自動運転車に取り組む理由は、交通事故をなくしたいからだ。人よりも情報処理が速く判断も正確なコンピューターが車を運転したら、世の中はどう変わるかを追及したのが自動運転車。」

すUberなどが米国で普及している。近い将来、スマホで自動運転車を呼び自宅に届けてくれる日が来る。日本では、スマホでタクシーを呼ぶサービスさえも認可されていないのが現状で、自動運転車によるタクシーの認可は、米国に比べかなり遅れると考えられる。たとえトヨタが自動運転車を世界で初めて販売しても、それに反対する勢力や規制が日本では強すぎるため、イノベーションは欧米に比べ小規模なものになる可能性が高い。

自動運転車の開発で最も重要なことはハッキング対策である。自動運転車が外部と通信で情報をやり取りする時に、ハッカーやクラッカーが自動運転車のコンピューターに不正侵入して情報を改竄^{かいざん}し、事故を起こす危険がある。ハッカーやクラッカーは遠隔操作でエンジンやブレーキを思いのままに操ることで大事故を引き起こすことも可能になる。このハッキング対策が完璧なものにならないと、自動運転車は絵に描いた餅になる。ハッキングやサイバー攻撃対策で実績のあるIT企業は、自動運転車のオペレーション・システムOS開発において、自動車メーカーよりも有利な立場に立つと考えられる。

自動運転車は、どこでも乗り捨てて勝手に自宅に帰ってくれ、また、必要なときに迎えに来てくれるので、レストランやショッピングモールやデパートやホテルには大駐車場が不要になる。また、地価の高い街の中心部に、大駐車場を設ける必要がなくなるため、土地の有効活用で街が活性化する。このように、自動運転車は新たなビジネスを誕生させる。自動運転車が一般化する時代には、我々一人一人が自動車を所有するのではなく、レールのない電車のような感覚で無人タクシーや無人ハイヤーを利用すると考えられる。インターネットは情報を繋げたが、自動運転車はリアルな人間や物を繋げるネットワーク社会を実現する。このネットワークで繋がった自動運転車を起点とする社会は、社会全体がコンピューター制御される。このコンピューター制御はネットワーク外部性が働くため特定の企業だけが占有し、その企業は社会全体を掌握する覇者になる。自動運転機能を組み込んだオペレーション・システムOSを手中に収める企業は、グーグルやアップルやクアルコムのようなIT企業になるのか、トヨタや独VWや米GMの御三家になるかは、今のところ誰にも読めない⁵⁸⁾。現時点で断言できるのは、スマホのOSや家電のOSと自動車のOSが異なるシステムになることは絶対にないことである。自動車を含め、社会のすべての物が同じOSで制御されるため、それを掌握した企業は巨万の富を

58) 小川紘一 [2014]「オープン＆クローズ戦略」翔泳社 「クルマがネットワークにつながり、付加価値の領域も競争ルールも大きく変わる現実が目の前に来ている。クアルコムは、自動車の中のデータと、運転情報などをネットワークへ送り出すルートに圧倒的な存在感を持つ。データの入り口をにぎるクアルコムは、クルマのネットワークにつながるとき、グーグル以上に大きな影響力を持つであろう。」「クアルコムはコア技術を知的財産で完全に守れる半導体チップに特化し、チップと他社の技術をつなぐインターフェイス領域にも知的財産を刷り込ませて公開し、その上で他をすべてオープン標準化するという、オープン＆クローズ戦略を徹底させた。テキサス・インスツルメンツは、3Gでクアルコムの知的財産を使わざるを得なくなり、WiFi技術の開発・調達も遅れ、スマホの半導体チップ戦線から脱落した。」

永続的に得ることができる。いずれにしても、自動運転車が社会全体を変革するイノベーションを巻き起こす日は、すぐそこまで来ている。

自動運転車の開発競争は、自動車メーカーと、グーグルやアップルやクアルコムなどのIT企業が入り乱れ、熾烈を極めることになる。今までに豊富に蓄積した情報の解析に優れた自動車メーカー⁵⁹⁾と、全体のネットワークを制御するシステム構築に優れたIT企業との協調と競争が繰り返される。自動車メーカーの選択肢は、グーグルかアップルか、デンソーかボッシュか、パナソニックか日立か、燃料電池車か電気自動車かの二者択一ではない。自動車メーカーは、複数の未知数を含んだ連立方程式を短い制限時間で解くことが求められる。トヨタにとって最悪のシナリオは、アンドロイドOSや自動運転車や資金力に優れたグーグルと、電気自動車で実績のあるテラス・モーターズが提携し、トヨタの前に立ちはだかることである。電気自動車と自動運転車は親和性が非常に強い。トヨタの手薄な電気自動車と自動運転車の合体が、社会を変革する起爆剤になることをトヨタは誰よりも良く理解している。IT企業と自動車メーカーだけでなく、運送業、保険業、旅行業、飲食業、小売業、製造業におけるM&Aが活発化し、社会システムが統一されることは間違いない。いち早く自動運転車を開発した企業ではなく、自動運転車の社会的価値を高めた企業が、自動運転車を起点するイノベーションの果実を丸取りできると考えられる。

その企業は自動車メーカーである必要はない。自動運転車のイノベーションを興す企業は、次のようなケースが考えられる。自動運転車のOSを掌握した企業か、自動運転車を遠隔操作する技術に優れたソフトウェア会社か、自動運転車のワイヤレス充電を可能にする無線技術を持った企業か、自動運転車のハッキング対策に優れたIT企業か、自動運転車のタクシーやリース会社か、自動運転車によるカーシェアリング会社か、自動運転車を活用したトラック輸送会社か、自動運転車と鉄道を組み合わせたハイブリッド鉄道会社か、自動運転車や無人航空機を使ったアミューズメント型旅行会社か、自動運転車とロボットを利用した無人の移動販売会社か、自動運転車を利用した動くレストランを経営する飲食業か、自動運転車を利用し患者のいる場所に駆け付ける移動する病院か。これらのビジネスは、公共の道路を移動中に行われるため新たな土地取得が不要であり、客が店に出向く必要がなく、無人であるため人件費が一切からない。このように自動運転車は、血管を流れる血液のように、社会を循環する「移動ビジ

59) 廣松隆志 [2014]「すべてがわかるIoT大全」日経BPムック 「ホンダはカーナビ向け情報配信サービス「インターナビ・リンク・プレミアムクラブ」を開始。185万台以上のホンダ車から59億キロメートル超の走行データを収集してクラウド上に蓄積し、カーナビのルート計算の高度化などに使っている。膨大な走行データを分析することで、急ブレーキ多発地点などを特定。そうした情報をクラウドから自動運転車に随時配信すれば、安全性の向上に直結する。また、自動運転に必要な情報処理の一部をクラウド化できれば車載システムを安価に構築できる。」

ネス」を誕生させる。自動運転車のイノベーションは、非常に広範囲にわたり、その影響は我々の生活や社会を根本的に変えるものとなる。

5—2 自動運転車の社会的価値

高峰譲吉博士⁶⁰⁾は、豊田佐吉に、発明するだけでなく、それが実用化されて社会的価値を生み出すイノベーションになるまで育て上げることが発明者の仕事である、と説いている。この発明を育てる仕事を怠れば、発明に何も寄与しなかった企業がイノベーションの果実を得ることになる。鈴木博毅は、「イノベーションと価値を結び付けられなかった場合、技術イノベーションや市場のパイオニアは往々にして、自分たちで卵を産み落としていながら、他社にそれを孵化される、という運命をたどりかねない。⁶¹⁾」と言っている。自動運転車を発明しただけで、自動運転車を育てて社会的価値を生み出すことを忘れると、自動運転車のイノベーションは発明者の予想したものとならないだけでなく、発明とまったく関係ない者がその果実を奪い取ることになる。自動運転車の発明がもたらすイノベーションは自動車業界が支配する可能性はむしろ少ないと言える。それはイノベーションが常に越境する特性を有しているためである。自動車業界以外のイノベーションを着想する力こそが、自動運転車の社会的価値を拡大し発展させることになる。

K・ケリーが「電気式白熱電球は発明され、再発明された。つまり一緒に発明され、何十もの「最初の発明」があった。「エジソンの電球」の中で、エジソン以前に23人の白熱電球の発明者があったことを述べている。23の電球は、発明者によってフィラメントの形、線の材料、電気の強さ、ソケットの形などがさまざまであった。⁶²⁾」と言っているように、エジソンは電球の最初の発明者ではない。何故、エジソンだけが電球の発明で有名になり、歴史に残る名声を与えられたのか。それはエジソンが米国中で電球の有効性を宣伝した結果、電球の社会的価値が広く認知されたためである。吉村慎吾が「エジソンはスワンが生み出した白熱電球を発電所、送電網という組み合わせで社会的に価値あるものへと発展させた。彼が生み出したのは技術ではなく社会的価値である。⁶³⁾」と言っている。コロンブスはアメリカ大陸の最初の発見者

60) 木本正次 [2014]「トヨタの経営精神」PHP文庫 高峰譲吉博士の言葉に豊田佐吉は心を打たれた。「発明を完成するには、発明家は最後までその場を離れてはいけません。発明品を実用化するものもまた、発明家の責任であります。発明者は発明品から離れてはならないのです。卵や雛のうちに人手に渡すから、途中で死んだり不具になったりするのです。立派な丈夫な翼が生えて、もうどこへ放っても大丈夫、大空を翔けて行くという確信がもてるまで、発明家は面倒を見る責任があるのです。これが発明を完成するゆえんではあるまいかと思うのです。」

61) 鈴木博毅 [2014]「戦略の教室」ダイヤモンド社

62) K・ケリー著、服部桂訳[2014]「テクニウム テクノロジーはどこへ向かうのか？」みすず書房

63) 吉村慎吾 [2014]「イノベーターズ 革新的価値創造者たち」ダイヤモンド社

ではない。紀元前にアジア人がアラスカを経由して大陸を発見し、さらに、約1000年前に北欧のバイキングが大陸を発見している。何故、コロンブスだけがアメリカ大陸発見で歴史に名を残したのか。それは、コロンブスが大陸発見を欧州で報告し社会に広く認知され、欧州から米国への移住などの社会的価値を生み出したためである。

蒸気機関車の発明自体はイノベーションではない。蒸気機関車の発明を利用して鉄道を作り人々が便利に利用できるようにしたことがイノベーションである。この社会的価値を高める仕事がいノベーションである。燃料電池車や電気自動車を発明しただけでは、イノベーションは興せない。燃料電池車や電気自動車が今よりも豊かで便利で安全で持続可能な社会に変革し、広く社会的価値が認知されなければ、イノベーションとは言えない。また、自動運転車が発明されただけではイノベーションは興らない。自動運転車をベースに考えられた社会システムが構築され、その社会的価値が広く周知されなければ、自動運転車のイノベーションは完成しない。

社会的価値を広く認識されるには、発明者やエンジニアだけが理解できる難解な科学や数学や理論で説明するのではなく、万人が実際に体験できる具体的な物やサービスである必要がある。人類にどれ程有効な発明であっても、一般人が社会的価値を理解できなければ、イノベーションとは言えない。また、発明の社会的価値を高めるのは、発明の進歩性が必須である。しかし、進歩し過ぎた発明は社会に受け入れてもらえないばかりか、社会的価値を生まない。社会にイノベーションを興すには、発明の進歩の速度が重要である。社会の進歩より早すぎた発明は、社会が受け入れないため社会的価値がない。しかし、誰よりも早く発明をしないと特許などの知的財産を他社に取得される危険がある。社会の進歩より1歩か2歩だけ早い発明、すなわち、「遅すぎず早すぎない発明」がイノベーションに最も近いと言える。180年前に発明された電気自動車と80年前に発明された燃料電池車が、何故、今、注目されるのか。それは、燃料電池車や電気自動車が現代社会に間に合ったことと、同時に、社会が燃料電池車や電気自動車にぴったり追い付いたためである。これは、「遅れるのはダメだが、早すぎるのはもっとダメ。」とトヨタが言い続けてきた所以である。

その社会の変化は、地球環境問題やエネルギー資源の枯渇問題への関心の高まりだけではない。上述したように、コンピューターの飛躍的な進歩、クラウド技術の普及、パワー半導体の発明、二次電池の進歩、センサーによる画像処理技術の発明などの、自動車業界とは一見関係ない社会変化である。それらの社会変化と燃料電池車や電気自動車や自動運転車が運良く遭遇し、今まさにイノベーションが生まれようとしている。

イノベーションを興すには、社会がどのように生まれ変わるかを予見しなければならない。望遠鏡の発明は発明後1年以内に木星の衛星の発見をもたらしたが、顕微鏡の発明は微生物の

発見に200年も要した。これは天文学者が衛星の存在を予測していたが、生物学者は微生物の存在を予想できなかったためである。発明者よりも、その発明を利用して社会的価値を先に見出した者がイノベーションの勝者となることを、ジム・コリンズが指摘している⁶⁴⁾。自動運転車のある社会を想定し、その時、我々の社会はどうあるべきかを考えることが大切である。自動運転車と人間が共存する社会を思い描くことができなければ、自動運転車のイノベーションは雲散霧消となる可能性も否定できない。

自動運転車の社会的価値を高めるのは、次のような事例が想定される。

1) 便利で快適な社会

- ・通勤時に車内で読書や仕事や仮眠などの自由時間を過ごせる書斎のある自動運転車
- ・趣味や興味に合わせて旅行に連れて行ってくれるツアーコンダクター型自動運転車
- ・外で飲酒した後、自動車のカーテンを閉めてリラックスして帰宅できる自動運転車
- ・車内で調理し、料理完成の時に合わせてデリバリーやケイタリングする自動運転車

2) 交通死亡事故のない社会

- ・交通違反（飲酒運転、居眠り運転、わき見運転、速度違反等）をなくす自動運転車
- ・交通死亡事故がなくなり被害者も加害者もなくなり、交通裁判をなくす自動運転車
- ・運転免許や道路交通法を改正させ、傷害保険料や医療負担を激減させる自動運転車
- ・交通死亡事故による交通遺児や、交通事故による身体障害者等をなくす自動運転車

3) 弱者にやさしい社会

- ・盲人，児童，高齢者，身体障害者などが好きな時に好きな場所に行ける自動運転車
- ・保育園児の送り迎えを無人で行うため，親の保育負担を軽減してくれる自動運転車
- ・高齢者をデイサービスや病院へ送り迎えするため介護負担を軽減できる自動運転車
- ・鉄道やバスの廃止で買い物弱者になった高齢者をスーパーに送り迎えする自動運転車

4) 健康で安全な社会

- ・自動車自体が盗難を察知し運転を中止し警察に通報する盗難防止に強い自動運転車
- ・交通事故や交通渋滞や地震や火災の危険な場所を事前に察知し回避する自動運転車
- ・深夜に無人で急速充電ステーションに行き，充電して自宅に帰ってくる自動運転車
- ・患者が助けを呼ぶ前に，患者の病気や怪我を遠隔診断し，走り出す自動運転救急車

5) 持続的に可能な社会

64) ジム・コリンズ著，牧野洋訳 [2012] 「ビジョナリー・カンパニー④」 日経BP社 「先駆的なイノベーション企業のうち最終的に市場の覇者として競争に勝ったのはたった9%だった。安全カミソリを先駆者として開発したのはジレットではなくスター，インスタントカメラを開発したのはボラロイドではなくデュブローニ，パソコン向け表計算ソフトを開発したのはマイクロソフトではなくビジコープ，アマゾンオンライン書籍販売の先駆者ではない。」

- ・ドライバーの乗り降りが不要になるため今までの2倍の駐車を可能にする自動運転車
- ・駐車場のないデパート、レストラン、ホテルを可能にし、街を活性化する自動運転車
- ・無人田植え機、無人稲刈り機、無人耕運機で農業の生産性を向上させる自動運転車
- ・産地直送の野菜や果物や鮮魚を積み、人間ではなくロボットが販売する自動運転車

イノベーションは一つの企業が興すものではなく、さまざまな業界や社会が興すと解釈すれば、最初に革新的な技術開発をもたらした企業の多くが、そのイノベーションの覇者にならなかった事実も容易に理解できる。社会的価値と自分の得意な土俵を合体させ、自分の領域に引き込むアクティブ・イノベーションができた企業がイノベーションの覇者になる。自動運転車、燃料電池車、電気自動車のある社会が、我々の生活、仕事、娯楽、医療、介護などと、どのように共存できるか、多角的で複眼的な議論が必要になる。

自動運転車もたらす便利で快適な社会、交通死亡事故のない社会、弱者にやさしい社会、健康で安全な社会、持続可能な社会などの社会的価値と、ロボット、人工知能、センサー、コンピューターの飛躍的な進歩が合体し、今まさに自動運転車の胎動が聴こえるところまで来た。社会的価値の創造こそが、次世代自動車によるイノベーションを興すエネルギーになると確信する。

6章 まとめ

自動運転車、燃料電池車、電気自動車に関するイノベーションの研究を行った結果、次のことが判明した。

- 1) トヨタ、ホンダ、ニッサンの自動車メーカーは、自動車のコンピューター化を推進し、ハイブリッド車や電気自動車や燃料電池車を生み出した。なかでも、トヨタは自動車のコンピューター化に関する研究開発比率が非常に高い。
- 2) 自動車のコンピューター化は、一酸化炭素や窒素酸化物などの有害物質の無害化に寄与し、ミリ波レーダーやレーザーレーダーやカメラなどのセンサーを活用した衝突防止に貢献し、自動車のコンピューター同士が通信する繋がる社会を実現する。
- 3) 自動車のコンピューター化は、パナソニック、日立製作所などの総合電機会社が自動車部品事業を拡大し、アップルやグーグルなどのIT企業が自動車業界へ参入する契機を作った。
- 4) 自動車のコンピューター化は、自動車メーカーと部品メーカーとの力関係を逆転させる可能性があり、自動車会社と系列会社との関係を変化させている。
- 5) トヨタは、デンソーと絶妙な距離感を保ちつつコンピューター化を推進している。トヨタは、トヨタ自身が系列企業以外との共同研究を行い、デンソーなどの系列企業がトヨタに

外の自動車メーカーとの共同研究を許すオープン戦略と、系列企業も競争相手と見なしてトヨタ単独で研究開発を行うクローズ戦略の両面を巧みに操っている。

- 6) デンソーは、日本にあるすべての自動車メーカーと共同研究を行い、すべての自動車会社と特許を共同出願している。これは、デンソーがすでにトヨタの系列企業としての顎木を外し終わっていると判断できる。
- 7) クリーンディーゼルエンジンの研究開発は、トヨタ、ホンダ、ニッサンとも極端に減少しており、トヨタ、ホンダ、ニッサンの弱点である。
- 8) ニッサンは、研究開発の16%を電気自動車に集中させており、電気自動車に命運をかけている。その理由は、仏ルノーとニッサンの関係から説明できる。
- 9) トヨタ系列企業単独と、トヨタと系列企業の電気自動車に関する共同研究の合計が、トヨタ単独の研究開発とはほぼ同じである。すなわち、トヨタファミリー全体の電気自動車開発に注がれるエネルギーは、ニッサンを遙かに越えている。
- 10) ガソリン車よりも部品点数が少なく単純構造の電気自動車は、コモディティ化の格好のターゲットになる可能性が高い。
- 11) シリコンカーバイドのパワー半導体が、電気自動車の走行距離を20%向上させ、酸化ガリウムなどの新素材がパワー半導体の性能をさらに向上させる。
- 12) 高張力鋼板の4分の1の重量と10倍の強度を持つ炭素繊維強化プラスチックCFRPが自動車の超軽量化を実現させている。CFRPの世界シェア70%を誇る日本企業の存在は、自動車の超軽量化で外国自動車メーカーより優位に立つことができる強力な援軍である。
- 13) 日本に技術力が高い燃料電池関連企業が多分野に広がっていることが、燃料電池車を推進する最大の理由である。
- 14) 燃料電池車の研究開発において、水素吸蔵合金の開発やメタノール改質の研究の失敗が、長い道草をした原因である。
- 15) トヨタとトヨタ系列企業の燃料電池車の研究開発は、ホンダとニッサンを寄せ付けない技術的優位を確保している。トヨタの燃料電池車の研究開始は他社よりも早く、特許数は2009年には年間1400件を超えている。ニッサンの燃料電池車の研究開始は遅く、2008年以降、燃料電池車の研究開発は急減している。
- 16) 自動車会社の研究開発は、次世代の電池開発に軸足を置くことになる。なかでも、全個体電池とリチウム空気電池とナトリウムイオン電池の研究開発は激しく、これらの技術を獲得した企業が次世代自動車の覇者に近づくことになる。
- 17) トヨタの燃料電池車の研究開発において、系列企業を含めた全トヨタの中でトヨタの研究開発が76%を占めている。これは、トヨタが最重要と考える仕事は、たとえ親しい系列企業にも渡さずトヨタ自身で行うことを表している。

- 18) 自動運転車は、交通事故を皆無にし、運転免許や自動車損害保険や街中の駐車場をなくし、無人タクシーや無人トラックが走る社会を実現する。
- 19) 自動運転のブルドーザーや無人航空機などが実用化される現在は、自動運転車の胎動期間である。胎動期間は、次に続くイノベーションが社会に受け入れてもらえるかを定めるさまざまなプロトタイプ（ β 版）が存在し、その社会的価値を育む熟成期間である。
- 20) 自動運転車の研究開発は、自動車メーカーとIT企業との協調と競争を繰り返し、さまざまな業界を巻き込んだ総力戦になる。自動車メーカーの選択肢は、グーグルかアップルか、デンソーかボッシュか、パナソニックか日立か、燃料電池車か電気自動車かの二者択一ではない。自動車メーカーは、複数の未知数を含んだ連立方程式を短い制限時間で解くことが求められる。
- 21) トヨタにとって最悪のシナリオは、アンドロイドOSや自動運転車や資金力に優れたグーグルと、電気自動車で実績のあるテラス・モーターズが提携し、トヨタの前に立ちはだかることである。トヨタの手薄な電気自動車と自動運転車の合体が、社会を変革する起爆剤になることをトヨタは誰よりも良く理解している。
- 22) ネットワークで繋がった自動運転車を起点とする社会は、社会全体がコンピューター制御される。コンピューター制御はネットワーク外部性が働くため特定の企業だけが占有し、その企業は社会全体を掌握する覇者になる。スマホのOSや家電のOSと自動車のOSが異なるシステムになることは絶対にならない。
- 23) インターネットは情報を繋げたが、自動運転車はリアルな人間や物を繋げるネットワーク社会を実現する。さらに、自動運転車は、血管を流れる血液のように、社会を循環する「移動ビジネス」を誕生させる。
- 24) 自動運転車は、便利で快適な社会、交通死亡事故のない社会、弱者にやさしい社会、健康で安全な社会、持続可能な社会を実現する。このような自動運転車の社会的価値を高めた企業が、次世代自動車の覇者になる。

参考文献

- ジェイムズ・グリック著、楡井浩一訳 [2014]「インフォメーション情報技術の人類史」新潮社
川北蒼 [2014]「ステイプ・ジョブズがデザインしていた未来」綜合法令出版
前田悟 [2014]「イノベーションの起こし方」KADOKAWA
雨宮寛二 [2013]「アップルの破壊的イノベーション」NTT出版
ジェイコブ・ゴールデンバーグ他、池村千秋訳 [2014]「インサイドボックス究極の創造的思考法」文芸春秋
吉田浩一郎 [2013]「世界の働き方を変えよう クラウドソーシングが生み出す新しいワークスタイル」綜合法令出版
ラム・チャラン [2014]「これからの経営は「南」から学べ」日本経済新聞社

- 丸幸弘 [2014]「世界を変えるビジネスは、熱から生まれる」日本実業出版社
- 野口悠紀雄 [2014]「変わった世界 変わらない日本」講談社現代新書
- デボラ・ベリー・ピシオーニ著，桃井緑美子訳 [2014]「シリコンバレー最強の仕組み」日経BP社
- K・ケリー著，服部桂訳 [2014]「テクニウム テクノロジーはどこへ向かうのか？」みすず書房
- 赤池学 [2014]「生物に学ぶイノベーション 進化38億年の超技術」NHK出版新書
- 赤祖父俊一 [2013]「知的創造の技術」日本経済新聞社
- 藤本雄一郎 [2013]「破壊的イノベーション」中央経済社
- ジョゼフ・H・ボイエット，ジミー・T・ボイエット，太田修二訳 [2014]「経営革命大全」日経ビジネス
- 中屋敷均 [2014]「生命のからくり」講談社現代新書
- 小泉直樹 [2010]「知的財産法入門」岩波新書
- 伊丹敬之，宮永博史 [2014]「技術を武器にする経営」日本経済新聞出版社
- 古田健二 [2014]「日本企業の真成長戦略」中央経済社
- 福井健策 [2012]「ネットの自由vs著作権」光文社新書
- 石井彰 [2014]「木材・石炭・シェールガス」PHP新書
- 本間琢也，上松宏吉 [2010]「燃料電池のキホン」ソフトバンククリエイティブ
- 永田裕二 [2014]「燃料電池という選択」ダイヤモンド社
- W・ブライアン・アーサー著，日暮雅通訳 [2011]「テクノロジーとイノベーション」みすず書房
- フランシス・マキナーニー著，倉田幸信訳 [2014]「日本企業はモノづくり至上主義で生き残れるか」ダイヤモンド社
- 五島綾子 [2014]「科学ブームの構造」みすず書房
- 西川有司 [2013]「資源循環革命」ピーケーシー
- クリステンセン等 [2014]「イノベーションの最終解」翔泳社
- 若松義人 [2013]「トヨタが現場ですっと繰り返してきた言葉」PHPビジネス新書
- スティーブ・ジョンソン著，田沢恭子訳 [2014]「PEERピア」インターシフト
- ケイン岩谷ゆかり著，井口耕二訳 [2014]「沈みゆく帝国」日経BP社
- 田村八洲夫 [2014]「石油文明はなぜ終わるのか」東洋出版
- 御堀直嗣 [2009]「電気自動車は日本を救う」C&R研究所
- 西川尚男 [2013]「新エネルギーの技術」東京電機大学出版局
- 西村吉男 [2014]「電子立国は、なぜ凋落したか」日経BP社
- 小川紘一 [2014]「オープン&クローズ戦略」翔泳社
- リタ・マグレイス著，鬼澤忍訳 [2014]「競争優位の終焉」日本経済出版社
- 吉村慎吾 [2014]「イノベーターズ 革新的価値創造者たち」ダイヤモンド社
- 長谷川英祐 [2010]「働かないアリに意義がある」メディアファクトリー新書
- 佐藤昇 [2014]「人材を育てるホンダ 競わせるサムスン」日経BP社
- ウィリアム・J・ボーモル著，田中健彦訳 [2014]「良い資本主義 悪い資本主義」書籍工房早山
- 江馬一弘 [2014]「光とは何か」宝島新書
- 泉谷渉 [2013]「シェールガス革命」東洋経済新報社
- 五十嵐淳平 [2013]「人体特許」PHP研究所
- 中沢弘基 [2014]「生命誕生」講談社現代新書

- 辻野晃一郎 [2014] 「成功体験はいらない」 PHPビジネス新書
- 鈴木博毅 [2014] 「戦略の教室」 ダイヤモンド社
- 山口利昭 [2014] 「国際カルテルが会社を滅ぼす」 同文館
- 三谷宏治 [2014] 「ビジネスモデル全史」 ディスカバリー
- 岩月伸郎 [2010] 「生きる哲学トヨタ生産方式」 幻冬舎新書
- 若松義人 [2014] 「新トヨタ式改善の教科書」 東洋経済新報社
- 木本正次 [2014] 「トヨタの経営精神」 PHP文庫
- 小川和也 [2014] 「デジタルは人間を奪うのか」 講談社現代新書
- リンダ・グラットソン著, 吉田普治訳 [2014] 「未来企業」 プレジデント社
- 藤井剛 [2014] 「CSV時代のイノベーション戦略」 ファーストプレス
- カトリーヌ・ブルガン著, 坪子理美訳 [2014] 「遺伝子の帝国」 中央公論新社
- 鶴原吉郎, 仲森智博 [2014] 「自動運転」 日経BP社
- 高橋正明 [2014] 「レッド・オーシャンで儲ける7つの法則」 マイナビ
- ジム・コリンズ著, 牧野洋訳 [2012] 「ビジョナリー・カンパニー④」 日経BP社
- 竹内一正 [2013] 「イーロン・マスクの野望」 朝日新聞出版
- 塚本潔 [2010] 「電気自動車ウォーズ」 朝日新聞出版
- 廣松隆志 [2014] 「すべてがわかるIoT大全」 日経BPムック
- [2014] 「次世代自動車2014」 日経ビジネス
- 柳澤大輔 [2009] 「アイデアは考えるな。」 日経BP

(2015年1月5日 受理)